



Miguel Antunes Mira Gonçalves

**Modelos para cálculo de ligações pilar-
viga com chapa de extremidade em
estruturas de aço**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de estruturas

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Gomes Rocha de
Almeida, Professor associado da Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Nova de Lisboa

Co-orientador: Mestre José António da Cruz Delgado,
Assistente convidado da Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof^a Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana
Arguente: Prof. Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos
Vogal: Prof. Doutor João Carlos Rocha de Almeida



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2014

‘Copyright’ Miguel Antunes Mira Gonçalves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Sem qualquer ordem em particular, quero agradecer aos meus orientadores, o Prof. Dr. João Carlos Gomes Rocha de Almeida e o Prof. Mestre José António da Cruz Delgado por todo o tempo e trabalho que dedicaram no auxílio deste trabalho. Um obrigado especial aos meus pais, não só por me terem acompanhado em toda a minha vida mas também por me terem ajudado muito no âmbito da dissertação. Por fim, a toda a minha família, amigos e namorada por todo o apoio que me deram e sempre darão.

Resumo

Neste trabalho, são apresentados e discutidos os procedimentos prescritos no Eurocódigo 3, Parte 1-8, para cálculo e dimensionamento de ligações pilar-viga com chapa de extremidade, em estruturas de aço.

Em particular, é analisado o método das componentes, que permite determinar a resistência e rigidez rotacional de juntas metálicas, possibilitando a utilização de ligações semi-rígidas, que frequentemente resultam em ligações mais económicas.

A metodologia descrita é aplicada em dois exemplos numéricos, tendo-se comparado os valores calculados com os resultados obtidos através de um programa de cálculo automático (Powerconnect) que também se baseia no método das componentes. As análises efetuadas permitem constatar que existem algumas vertentes do programa que podem ser melhoradas.

Recorreu-se ainda a um programa de cálculo automático comercial (Sap2000) para comparar os esforços atuantes numa estrutura metálica com ligações rígidas e semi-rígidas, tendo-se concluído que existem diferenças significativas entre as distribuições de esforços obtidas para as duas situações.

Termos chave: ligações pilar-viga, chapa de extremidade, método das componentes, ligações semi-rígidas.

Abstract

The goal of this dissertation is to present and discuss the procedures described in the Eurocode 3, Part 1-8, for the calculation and design of beam-column connections with end plate in steel structures.

In particular, attention is given to the component method, which allows determination of the strength and rotational stiffness of steel joints, enabling the use of semi-rigid connections, often resulting in more economical connections.

The methodology presented is applied to two numerical examples with the purpose of comparing calculated values with the results obtained using the computer program PowerConnect, also based on the component method. It was found that certain aspects of the program can be improved.

The commercial computer program SAP2000 was also used in order to compare the forces acting on a steel structure with rigid and semi-rigid connections. It was concluded that the two situations lead to significant differences in the distributions of forces obtained.

Key terms: beam-column connections, end plate, component method, semi-rigid connections.

Índice

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Enquadramento e objetivos	1
1.2 – Organização do trabalho.....	2
2 – MÉTODO DAS COMPONENTES	3
2.1 – Introdução ao método das componentes	3
2.2 – Análise do comportamento das componentes	7
2.3 – Elementos tracionados em T equivalente.....	9
2.3.1 – Considerações gerais	9
2.3.2 – Modos de rotura	9
2.4 – Resistência das componentes essenciais.....	14
2.4.1 – Alma do pilar solicitada ao esforço transversal	14
2.4.2 – Alma do pilar sujeita a compressão transversal	16
2.4.3 – Alma do pilar sob tração transversal.....	19
2.4.4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal	19
2.4.5 – Chapa de extremidade à flexão	23
2.4.6 – Banzo e Alma da viga em compressão	24
2.4.7 – Alma de viga em tração	25
2.4.8 – Parafusos à tração	25
2.4.9 – Resistência ao punçoamento.....	25
2.4.10 – Soldaduras solicitadas à tração ou corte	26
2.4.11 – Parafusos ao corte	27
2.5 – Cálculo do momento resistente da ligação.....	27
2.5.1 – Verificação de segurança à flexão	27
2.5.2 – Momento resistente de uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade	28
2.6 – Verificação de segurança ao esforço transversal	29
Assim, tendo em conta que existem dois parafusos por cada alinhamento, a força máxima de corte correspondente a cada linha de tração é dada por:	29
2.7 – Cálculo da rigidez de cada componente.....	29
2.8 – Estimativa da rigidez rotacional de uma ligação	31
2.9 – Traçado da curva momento-rotação.....	33
2.10 – Classificação de uma ligação viga-pilar quanto à sua rigidez.....	36

3 – Programas de cálculo automático	37
3.1 – Considerações gerais	37
3.2 – Powerconnect	37
3.3 – SAP2000	40
4 – Casos de estudo.....	41
4.1– Ligação aparafusada com chapa de extremidade não reforçada	41
4.1.1 – Descrição dos elementos da ligação	41
4.1.2 – Identificação das componentes.....	42
4.1.3 – Considerações iniciais de dimensionamento.....	43
4.1.4 – Cálculo do valor resistente das componentes	43
4.1.5 – Cálculo do momento resistente da ligação	61
4.1.6 – Verificação de segurança à flexão	64
4.1.7 – Verificação de segurança ao esforço transverso.....	64
4.1.8 – Cálculo da rigidez axial das componentes.....	65
4.1.9 – Cálculo da rigidez rotacional da junta	66
4.1.10 – Curva momento rotação da curva.....	67
4.1.11 – Classificação da ligação quanto à sua rigidez	68
4.1.12 – Comparação dos resultados calculados manualmente com os do Powerconnect	69
4.2 – Ligação aparafusada reforçada com chapa de extremidade	71
4.2.1 – Soluções de reforço consideradas.....	71
4.2.2 – Descrição da solução de reforço atribuída	73
4.2.3 – Cálculo da resistência das componentes	74
4.2.4 – Momento resistente da ligação reforçada.....	80
4.2.5 – Verificação de segurança à flexão	81
4.2.6 – Verificação de segurança ao esforço transverso.....	81
4.2.7 – Rigidez axial das componentes	82
4.2.8 – Rigidez rotacional da junta.....	82
4.2.9 – Classificação da ligação quanto à sua rigidez	83
4.2.10 – Comparação dos resultados calculados manualmente com os resultados do Powerconnect.....	83
5 – Ligações Semi-rígidas: modelação e resultados	85
5.1 – Modelo 1	85

5.2 – Modelo 2	86
5.3 – Modelo 3	87
5.4 – Sobreposição de efeitos dos modelos 2 e 3 do Sap2000 e comparação com o primeiro modelo	88
6 – Caracterização da curva momento-rotação através de uma equação polinomial.....	91
6.1 – Método de cálculo da equação polinomial.....	91
6.2 – Aplicação do método alternativo para a caracterização da curva momento rotação dos casos de estudo do capítulo 4.....	93
7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	97
7.1 – Avaliação do desempenho do Powerconnect	97
7.2 – Modelação de ligações semi-rígidas em projeto	97
7.3 – Aproximação polinomial da curva momento-rotação	98
Bibliografia	99
Anexo – Resistências e rigidezes das componentes das ligações analisadas	101

Índice de Quadros

Quadro 2. 1: Valor resistente do banzo da peça em T equivalente tracionada, [4]	11
Quadro 2.2: Coeficiente de redução ω , [4]	18
Quadro 2.3: Parâmetro de transformação β , [4]	18
Quadro 2.4: Comprimento efetivo do banzo do pilar não reforçado à flexão transversal, [4]	20
Quadro 2.5: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão com reforços transversais, [4]	22
Quadro 2.6: Comprimentos efetivos de uma chapa de extremidade à flexão, [4]	23
Quadro 2.7: Fator de correlação β_w , [4]	26
Quadro 2.8: Cálculo da rigidez axial das componentes de uma ligação aparafusada com chapa de extremidade, [4]	30
Quadro 2.9: Estimação de Ψ , [4]	33
Quadro 2.10: Coeficiente de alteração da rigidez Γ , [4]	35
Quadro 4.1: Propriedades mecânicas e geométricas dos perfis considerados	41
Quadro 4.2: Propriedades mecânicas e geométricas dos parafusos considerados, [4] e [2]	42
Quadro 4.3: Identificação das componentes ativas em cada linha de compressão ou tração	43
Quadro 4. 4: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)	47
Quadro 4.5: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)	49
Quadro 4. 6: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)	50
Quadro 4.7: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2 (ligação não reforçada)	51
Quadro 4.8: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2 (ligação não reforçada)	51
Quadro 4. 9: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)	54
Quadro 4. 10: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 3ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)	57
Quadro 4.11: Valor resistente de cada linha de tração (ligação não reforçada)	61
Quadro 4.12: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação reforçada)	77
Quadro 4.13: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação reforçada)	78
Quadro 4.14: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada)	78
Quadro 4.15: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 3ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada)	78

Quadro 4. 16: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 4ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada).....	79
Quadro 4.17: Valor resistente das linhas de tração e compressão da ligação reforçada	80
Quadro A.1: Resistência das componentes 3 e 4 da ligação não reforçada	102
Quadro A.2: Resistência das componentes 5 e 8 da ligação não reforçada	103
Quadro A.3: Resistência das componentes 1, 2 e 7 da ligação não reforçada	104
Quadro A.4: Rigidez das componentes da ligação não reforçada.....	104
Quadro A.5: Resistência dos elementos submetidos ao corte da ligação não reforçada	104
Quadro A.6: Resistência das componentes 3 e 4 da ligação reforçada	105
Quadro A.7: Resistência das componentes 5 e 8 da ligação reforçada	106
Quadro A.8: Resistência das componentes 1, 2 e 7 da ligação reforçada	107
Quadro A.9: Rigidez das componentes da ligação reforçada.....	107
Quadro A.10: Resistência dos elementos submetidos ao corte da ligação reforçada	107

Índice de Figuras

Figura 2.1: Trajetórias de forças desenvolvidas numa ligação metálica, [12]	3
Figura 2.2: Curvas momento-rotação de vários tipos de ligação obtidas através de análises experimentais e numéricas, [6]	4
Figura 2.3: Comparação da curva momento-rotação de uma ligação com uma aproximação bilinear .	4
Figura 2.4: Modelo mecânico de uma ligação viga-pilar através de cantoneiras	5
Figura 2.5: Curva força-deformação de uma componente de ductilidade elevada e respetiva aproximação bilinear, [8]	7
Figura 2.6: Curva força-deformação de uma componente de ductilidade limitada e respetiva aproximação bilinear, [12]	8
Figura 2.7: Curva força-deformação de uma componente frágil elevada e respetiva aproximação bilinear, [12]	8
Figura 2.8: Peça em T equivalente tracionada, [4]	9
Figura 2.9: 1º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]	9
Figura 2.10: 2º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]	10
Figura 2.11: 3º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]	10
Figura 2.12: Parâmetros geométricos da peça em T equivalente, [4]	12
Figura 2.13: Linhas de parafusos atuando isoladamente ou em grupo, [9]	12
Figura 2.14: Distribuição de forças numa ligação aparafusada, [10]	13
Figura 2.15: Exemplos de reforço da alma do pilar, [4]	15
Figura 2.16: Junta com reforços transversais no pilar	15
Figura 2.17: Alma de coluna em compressão transversal	16
Figura 2.18: Dimensões geométricas do banzo de um pilar, [4]	21
Figura 2.19: Valores de α para banzos reforçados de colunas e para chapas de extremidade, [4]. ...	22
Figura 2.20: Parâmetros geométricos de uma chapa de extremidade, [4]	24
Figura 2.21: Espessura de um cordão de soldadura com elevada penetração, [4].	26
Figura 2.22: Ligação com chapa de extremidade aparafusada apenas com uma linha de parafusos à tração, [4]	28
Figura 2.23: Modelo simplificado de uma ligação com chapa de extremidade e duas linhas de parafusos à tração.	28
Figura 2.24: Modelo mecânico de uma ligação viga-pilar aparafusada com placa de extremidade	31
Figura 2. 25: Simplificação do modelo mecânico de uma ligação viga-pilar	31
Figura 2. 26: Simplificação adicional do modelo mecânico de uma ligação viga-pilar	32
Figura 2.27: Rigidez de rotação a utilizar na análise global elástica, [4]	34
Figura 2.28: Relação momento-rotação de cálculo simplificada, [4]	34
Figura 2.29: Aproximação trilinear de uma curva momento-rotação	35

Figura 3.1: Tipos de ligações com transmissão de momentos no Powerconnect	38
Figura 3.2: Definição da posição dos parafusos no Powerconnect	38
Figura 3.3: Definição da geometria da chapa de extremidade no Powerconnect	38
Figura 3.4: Pormenorizações instantâneas no Powerconnect.....	39
Figura 3.5: Exemplo de uma curva momento-rotação de uma ligação modelada no Powerconnect ..	39
Figura 4.1: Geometria da ligação não reforçada.....	41
Figura 4.2: Identificação das componentes ativas (primeiro caso de estudo)	43
Figura 4.3: Distribuição de tensões no pilar em regime elástico.....	45
Figura 4.4: Cordões de soldadura sujeitos à tração	62
Figura 4.5: Curva momento rotação do primeiro caso de estudo	68
Figura 4.6: Ligação reforçada com chapa de gusset	71
Figura 4.7: Ligação reforçada com esquadro de reforço	72
Figura 4.8: Ligação reforçada com chapa de alma no pilar	72
Figura 4.9: Ligação reforçada com chapa de alma e placas transversais no pilar	73
Figura 4.10: Curva momento-rotação do segundo caso de estudo	84
Figura 5.1: Modelo 1 do SAP2000	85
Figura 5.2: Diagrama de momentos fletores do 1º modelo do SAP2000	85
Figura 5.3: Modelo 2 do SAP2000	86
Figura 5.4: Diagrama de momentos fletores do 2º modelo do Sap2000	87
Figura 5.5: Diagrama de momentos fletores do 3º modelo do Sap2000	88
Figura 6.1: Aproximações polinomial e trilinear da curva momento rotação do primeiro caso de estudo	94
Figura 6.2: Aproximações polinomiais e trilinear da curva momento rotação do segundo caso de estudo	94
Figura 6.3: Diferença relativa entre os momentos atuantes obtidos pelas aproximações trilinear e polinomial das curvas momento-rotação correspondentes aos casos de estudo 4.1 e 4.2	95

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

$\bar{\lambda}_p$	Esbelteza de uma chapa de aço
h_b	Altura da secção da viga
h_c	Altura da secção da coluna
h_r	Distância entre a fiada de parafusos r e o centro de compressão
A_c	Área da secção transversal da coluna
A_{st}	Área efetiva do reforço transversal à compressão
A_{vc}	Área resistente ao corte da alma da coluna
A_s	Área da secção roscada do parafuso
$B_{p,Rd}$	Resistência ao punçoamento
$F_{c,fb,Rd,c,m}$	Resistência de cálculo do banzo e alma da viga à compressão
$F_{c,fb,Rd,Pc}$	Resistência obtida no Powerconnect do banzo e alma da viga à compressão
$F_{c,fb,Rd}$	Resistência do Banzo e Alma da viga à compressão
$F_{c,wc,Rd}$	Resistência da alma do pilar à compressão transversal
$F_{t,Rd}$	Resistência de um parafuso à tração
$F_{T,Rd}$	Resistência à tração do banzo de uma peça em T equivalente à tração
$F_{t,wb,Rd}$	Resistência da alma da viga à tração transversal
$F_{t,wc,Rd}$	Resistência da alma do pilar à tração transversal
$F_{tr,Rd}$	Resistência efetiva de cálculo à tração da fiada de parafusos r
$F_{v,Rd}$	Resistência de um parafuso ao corte
$F_{w,Rd}$	Resistência de um cordão de soldadura ao corte ou à tração por unidade de comprimento
$F_{W,Rd}$	Resistência total de um cordão de soldadura ao corte ou à tração
F^c	Força de cedência
$F_{t,Rd}$	Resistência de um parafuso à tração
I_b	Inercia da secção da viga
I_c	Inercia da secção do pilar
K_b	Média de I_b/L_b para todas as vigas dos andares superiores ao estudado
K_c	Média de I_c/L_c para todos os pilares do andar estudado
K^e	Rigidez de uma componente em regime elástico
K^p	Rigidez de uma componente em regime plástico

L_b	Vão da viga
L_c	Altura do piso
$M_{b,Rd}$	Momento resistente da viga
$M_{Ed(-)}$	Momento atuante mínimo na viga
$M_{Ed(+)}$	Momento atuante máximo na viga
$M_{j,Ed}$	Momento atuante na ligação
$M_{j,Rd,c,m}$	Momento resistente de cálculo da ligação
$M_{j,Rd,Pc}$	Momento resistente da ligação modelada no Powerconnect
$M_{j,Rd}$	Momento fletor resistente da ligação
$M_{pl,fc,Rd}$	Momento resistente do banzo do pilar em regime plástico
$M_{pl,st,Rd}$	Momento resistente do reforço transversal do pilar em regime plástico
$M_{w,Rd}$	Momento resistente absorvido pelos cordões de soldadura
$N_{j,Ed}$	Esforço axial atuante na ligação
$N_{j,Rd}$	Resistência da ligação ao esforço axial
$N_{pl,Rd}$	Resistência plástica ao esforço axial
$N_{pl,st,Rd}$	Resistência plástica do reforço transversal à compressão
$P_{r,n,iso}$	Resistência da linha de parafusos n isolada
$P_{r,n,m}$	Resistência do grupo de parafusos que vai da linha m até à linha n
$P_{r,n}$	Resistência da linha de parafusos n
$S_{j,3}$	Rigidez rotacional em regime não linear
$S_{j,ini,Pc}$	Rigidez rotacional inicial da ligação modelada no Powerconnect
$S_{j,ini}$	Rigidez rotacional inicial da ligação
$S_{j,Pc}$	Rigidez rotacional reduzida da ligação modelada no Powerconnect
S_j	Rigidez rotacional da ligação
V_{Ed}	Esforço transversal atuante na ligação
V_{Rd}	Esforço transversal resistente da ligação
$V_{wp,add,Rd}$	Resistência adicional da alma do pilar ao esforço transversal devida a um reforço transversal
$V_{wp,Rd}$	Resistência da alma do pilar ao esforço transversal
a_p	Espessura do cordão de soldadura que liga o banzo da viga à placa de extremidade
b_c	Largura do banzo da coluna

$b_{\text{eff,c,wc}}$	Largura efetiva da alma da coluna em compressão transversal
$b_{\text{eff,t,wb}}$	Largura efetiva da alma da coluna em tração transversal
$b_{\text{eff,t,wc}}$	Largura efetiva da alma da coluna em tração transversal
b_p	Parâmetro geométrico representado na figura 2.20
b_s	Largura da chapa de reforço da alma do pilar
d_0	Diâmetro do furo
d_c	Distância entre banzos do pilar, excluindo raios de concordância
d_m	Largura da cabeça do parafuso ou da porca
d_s	Distância entre os centros geométricos dos reforços transversais
d_w	Diâmetro da anilha do parafuso
e_1	Distância entre uma linha de parafusos e a extremidade do pilar na direção longitudinal deste
e_{min}	Parâmetro geométrico representado na figura 2.12
e_p	Espessura da porca
e_x	Parâmetro geométrico representado na figura 2.20
f_u	Tensão última
f_{ub}	Tensão de rotura dos parafusos
$f_{vw,d}$	Resistência de um cordão de soldadura a tensões de corte ou de tração
$f_{y,bp}$	Tensão de cedência das contrachapas
$f_{y,st}$	Tensão de cedência do reforço transversal
$f_{y,wc}$	Tensão de cedência da alma da coluna
f_y	Tensão de cedência
f_{yb}	Tensão de cedência dos parafusos
k_2	Coeficiente que para parafusos regulares considera-se igual a 0,9
$k_{\text{eff,r}}$	Rigidez axial efetiva da linha de parafusos r
k_{eq}	Rigidez axial equivalente
k_i	Rigidez axial da componente i
k_{wc}	Coeficiente de redução dependente da tensão de compressão na alma do pilar
l_b	Comprimento do parafuso suscetível a alongamento
$l_{\text{eff},1}$	Comprimento efetivo do banzo de uma peça em T à flexão para o modo de rotura 1
$l_{\text{eff},2}$	Comprimento efetivo do banzo de uma peça em T à flexão para o modo de rotura 2

$l_{\text{eff,cp}}$	Comprimento efetivo do banzo de uma peça em T à flexão com troços circulares
$l_{\text{eff,nc}}$	Comprimento efetivo do banzo de uma peça em T à flexão sem troços circulares
l_s	Comprimento da chapa de reforço da alma do pilar
$l_{w,\text{eff}}$	Comprimento efetivo de um cordão de soldadura
m_2	Parâmetro geométrico representado na figura 2.19
m_x	Parâmetro geométrico representado na figura 2.20
n_b	Número de linhas de parafusos
q_1	Carga uniformemente distribuída do modelo 1 do Sap2000
q_2	Carga uniformemente distribuída do modelo 2 do Sap2000
q_3	Carga uniformemente distribuída do modelo 3 do Sap2000
r_c	Raio de concordância da coluna
s_1	Espessura da anilha
s_p	Comprimento obtido por difusão a 45° na chapa de extremidade
t_{bp}	Espessura das contrachapas
t_f	Espessura do banzo
t_{fb}	Espessura do banzo da viga
t_{fc}	Espessura do banzo da coluna
t_p	Espessura da chapa de aço
t_s	Espessura da chapa de reforço da alma do pilar
$t_{w,\text{eff}}$	Espessura efetiva da alma do pilar reforçada à tração transversal
t_w	Espessura da alma
$t_{wc,\text{eff}}$	Espessura efetiva da alma do pilar reforçada à compressão transversal
t_{wc}	Espessura da alma da coluna
w_{el}	Módulo elástico de flexão
w_{pl}	Módulo plástico de flexão
z_{eq}	Braço do binário equivalente
Δ^y	Deformação de cedência
Δ^y	Deformação característica
β_w	Fator de correlação
γ_{M0}	Coeficiente de segurança à cedência das secções

γ_{M1}	Coeficiente de segurança à encurvadura
γ_{M2}	Coeficiente de segurança para ligações
$\varepsilon_{Fc,fb}$	Erro relativo da resistência do banzo e alma da viga à compressão no Powerconnect
$\varepsilon_{M,Rd}$	Erro relativo do momento resistente no Powerconnect
$\varepsilon_{S,ini}$	Erro relativo da rigidez rotacional inicial no Powerconnect
ε_S	Erro relativo da rigidez rotacional reduzida no Powerconnect
$\sigma_{com,Ed}$	Tensão de compressão longitudinal máxima na alma do pilar devida ao esforço axial e ao momento
ϕ_{Cd}	Capacidade de rotação da ligação
$\phi_{j,Ed}$	Rotação da ligação
$\phi_{j,el}$	Rotação da ligação limite em regime elástico
$\phi_{j,Rd}$	Rotação da ligação quando é atingido o momento resistente
h	Altura do perfil metálico
η	Coeficiente de modificação de rigidez
Ψ	Coeficiente obtido no quadro 2.9
A	Área bruta da secção transversal de um perfil metálico ou de um parafuso
E	Módulo de elasticidade do aço
I	Momento de inércia de um perfil metálico
Q	Força de alavanca
a	Espessura do cordão de soldadura
b	Largura do perfil metálico
d	Diâmetro do parafuso
e	Parâmetro geométrico representado na figura 2.20
k	Espessura da cabeça do parafuso
k	Rigidez axial de uma componente da ligação
m	Parâmetro geométrico representado na figura 2.12 e 2.8
p	Distância entre duas linhas de parafusos
r	Raio de concordância para perfis laminados I ou H
s	No caso de perfis laminados I ou H, é igual ao raio de concordância
z	Braço do binário simplificado
α	Coeficiente obtido a partir do ábaco da figura 2.19

β	Parâmetro de transformação obtido através do quadro 2.3
μ	Relação entre a rigidez de rotação e a rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}/S_j$
ρ	Coefficiente de redução para contabilizar a encurvadura da chapa
ω	Coefficiente de redução indicado no quadro 2.2, para contabilizar interação com o esforço transversal atuante na coluna

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento e objetivos

À medida que os conhecimentos científicos do ser humano se expandem, as suas criações tendem a testar os limites do conhecimento, permitindo assim descobrir novas fronteiras a serem ultrapassadas.

No que toca à engenharia civil, esta evolução traduz-se na conceção de estruturas cada vez mais arrojadas, caracterizadas por grandes vãos e alturas. Nestas condições, sabendo que as propriedades mecânicas do aço são no geral bem mais elevadas do que as do betão, faz todo o sentido a adoção do aço como o material principal em elementos estruturais.

Comparando as estruturas de aço com as de betão, apesar do aço ser um material mais caro, os seus elementos são pré fabricados e a sua assemblagem é feita rapidamente. Por isso, numa sociedade em que “tempo é dinheiro”, é normal que em muitos países o aço seja mais utilizado do que o betão.

Contudo, em Portugal as estruturas de aço são pouco divulgadas, devido à mão-de-obra barata (que favorece o uso do betão) e à falta de rotina e conhecimentos de alguns projetistas. Assim, para que o país possa usufruir das vantagens da construção metálica, torna-se necessário a elaboração de estudos e trabalhos de investigação que permitam contribuir para a melhoria dos conhecimentos neste domínio.

Este trabalho tem o objetivo geral de efetuar um estudo sobre o método das componentes, aplicando as disposições prescritas no capítulo 6 do EC 3, parte 1-8, sendo que este método permite não só calcular a resistência de uma ligação como também classificá-la quanto à sua rigidez e determinar a sua capacidade de rotação, permitindo assim ao projetista a utilização de ligações semi-rígidas, ou seja, ligações que não funcionam como rótulas nem encastramentos perfeitos mas sim como molas rotacionais. Este tipo de ligação permite o uso de perfis e elementos menos resistentes e consequentemente custos mais reduzidos.

Porém, este método é pouco utilizado no dimensionamento de estruturas de aço em Portugal pois trata-se de um método relativamente moroso e complexo; como consequência, os projetistas preferem sobredimensionar as ligações, o que obviamente implica um orçamento mais elevado. Contudo, existem atualmente programas de cálculo automático eficientes e fáceis de utilizar que permitem aplicar o método das componentes de acordo com o EC 3. Assim, é possível usufruir, sem grande esforço, das vantagens da adoção deste método para o dimensionamento de estruturas.

Para verificar a eficiência e o potencial de um destes programas, denominado PowerConnect 2012, foram analisados dois casos de estudo de ligação viga-pilar aparafusada com placa de extremidade, uma reforçada e a outra não, e compararam-se os resultados obtidos manualmente com os obtidos pelo programa. São também efetuadas análises estáticas globais no programa de elementos finitos SAP 2000, para uma estrutura com ligações viga-pilar rígidas e para outra com ligações semi-rígidas, comparando-se os diagramas de momentos respetivos.

1.2 – Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em sete capítulos, o primeiro dos quais consiste numa breve introdução.

No segundo capítulo, apresenta-se uma descrição do método das componentes incluindo a sua fundamentação teórica e as metodologias de cálculos prescritas no EC3, parte 1-8, com particular destaque para a determinação da resistência e da rigidez rotacional de ligações aparafusadas com chapa de extremidade sujeitas à flexão.

No terceiro capítulo encontra-se uma breve descrição dos programas comerciais de cálculo automático Powerconnect e Sap2000, utilizados no presente estudo para verificação de segurança de ligações e determinação de esforços atuantes numa estrutura de aço.

No quarto capítulo, são apresentados dois casos de estudo de ligações aparafusadas com chapa de extremidade, com o objetivo de aplicação dos procedimentos descritos no segundo capítulo e comparação dos valores calculados com os resultados obtidos através do programa Powerconnect para cálculo automático de ligações.

No quinto capítulo são modeladas no programa de elementos finitos Sap2000 estruturas de aço com ligações rígidas e semi-rígidas, analisando-se as distribuições de esforços resultantes para os dois casos.

No sexto capítulo, apresenta-se e discute-se uma metodologia alternativa para a representação do comportamento mecânico de uma ligação metálica.

Finalmente o sétimo capítulo contém as principais conclusões e recomendações para desenvolvimentos futuros no âmbito do tema abordado nesta dissertação.

2 – MÉTODO DAS COMPONENTES

2.1 – Introdução ao método das componentes

O método das componentes permite avaliar a resistência e o comportamento mecânico de uma ligação, [12], encontrando-se a sua aplicação referida no EC3, parte 1-8.

A origem deste método remonta a 1974, quando Zoetemeijer iniciou um estudo sobre a zona tracionada de uma ligação, baseando-se num modelo de escoras e tirantes para determinar a trajetória das forças de tração desenvolvidas (ver figura 2.1), [12].

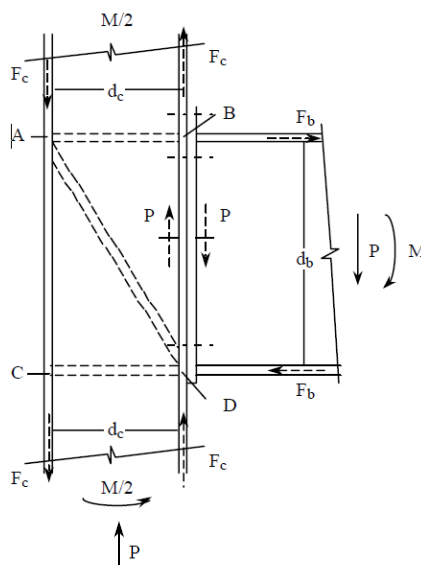


Figura 2.1: Trajetórias de forças desenvolvidas numa ligação metálica, [12]

Esta abordagem consiste em limitar as forças desenvolvidas na ligação ao valor de resistência da componente mais “frágil” de cada linha de tração ou compressão. Assim, é necessário identificar todas as componentes ativas na ligação (soldadura à tração, banzo do pilar à flexão, etc...) e calcular a sua resistência, [12].

Contudo, para um dimensionamento mais rigoroso e económico, não só da ligação mas também da própria estrutura global, é também necessário avaliar a deformabilidade da ligação.

Vários testes realizados (ver figura 2.2) mostraram que o comportamento mecânico de uma ligação metálica é caracterizado por uma curva não linear que relaciona o momento atuante, $M_{j,Ed}$, com a rotação introduzida na ligação, ϕ_{Ed} , a qual é denominada curva momento-rotação. O declive desta curva em cada ponto é equivalente à rigidez rotacional da ligação, S_j , [8].

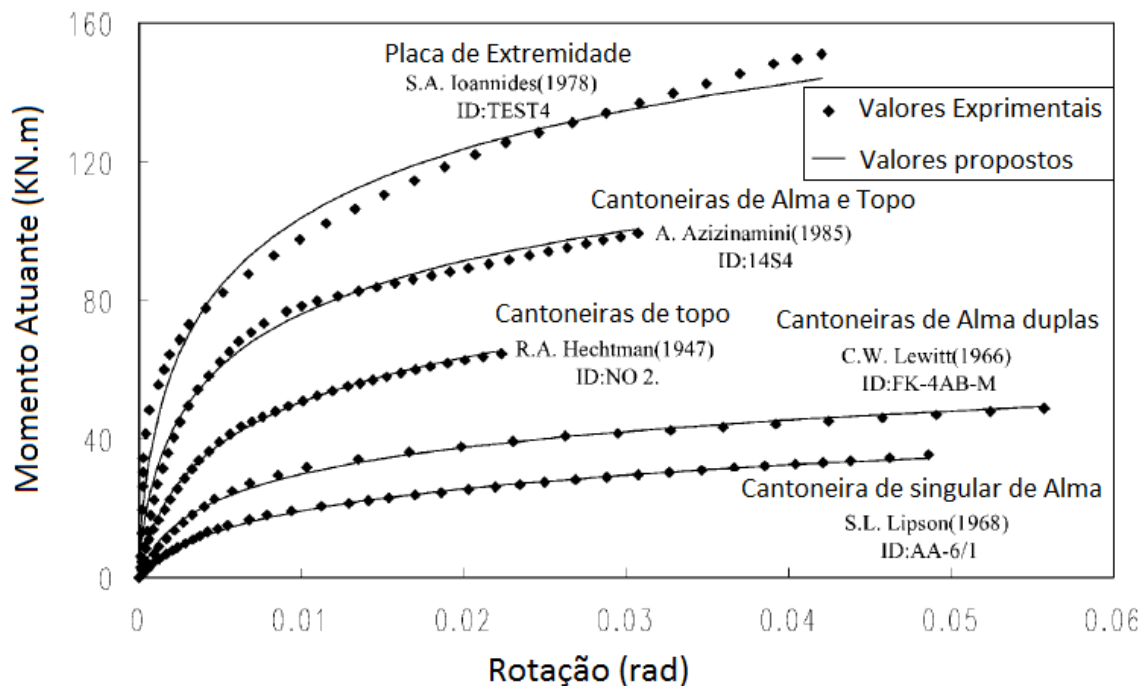


Figura 2.2: Curvas momento-rotação de vários tipos de ligação obtidas através de análises experimentais e numéricas, [6]

Do ponto de vista prático de dimensionamento, não é viável proceder à caracterização exata desta curva para uma dada situação de projeto pois tal curva só pode ser obtida experimentalmente variando os parâmetros de caso para caso. Assim, em 1995, Weynand propôs que o comportamento mecânico das ligações fosse estimado através de métodos simplificados, [12]. Um exemplo desta metodologia é a caracterização da curva momento-rotação através de uma aproximação bilinear (Figura 2.3).

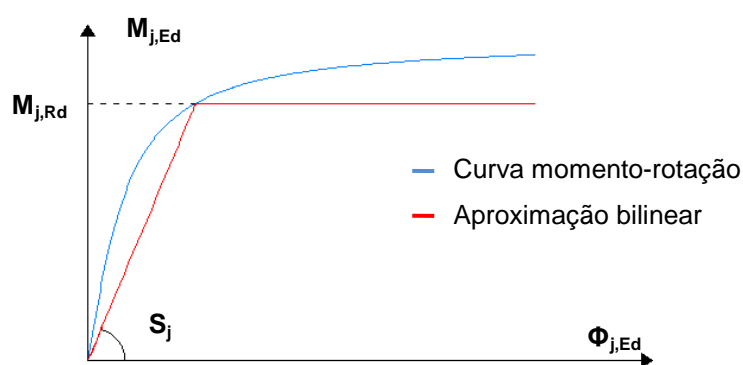


Figura 2.3: Comparação da curva momento-rotação de uma ligação com uma aproximação bilinear

Esta aproximação resulta de um modelo mecânico simplificado em que as componentes da ligação são representadas como molas deformáveis axialmente, dispostas em paralelo ou em série (ver figura 2.4). A relação força-deformação adotada para estas molas pode ter origem analítica, numérica ou experimental.

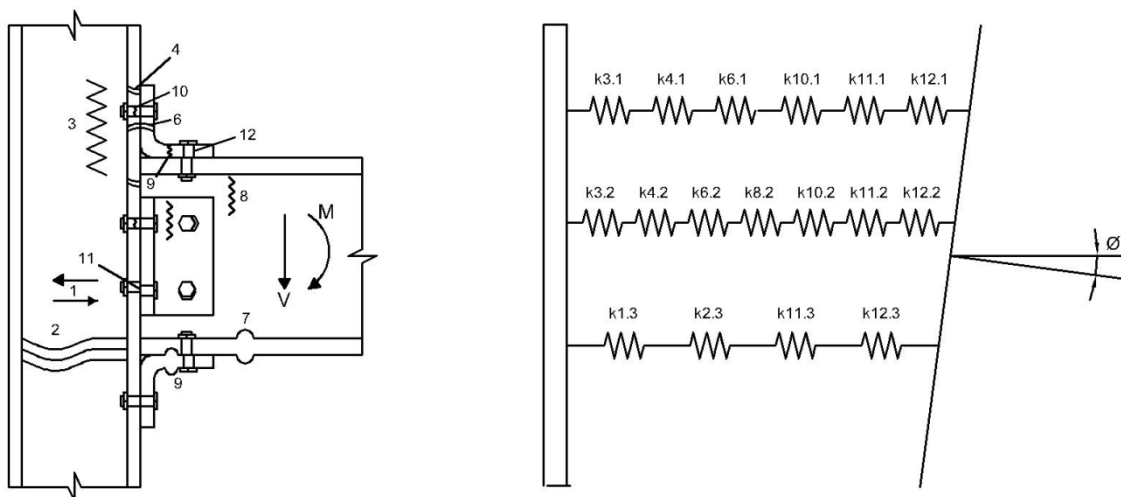


Figura 2.4: Modelo mecânico de uma ligação viga-pilar através de cantoneiras

Conhecido hoje em dia como “método das componentes”, este método foi adotado pelo EC 3 em 1998, [12]. O cálculo da resistência e rigidez das componentes que existem nas ligações é explicitado no capítulo 6 do EC3:1-8. Assim, a aplicação deste método consiste em identificar as seguintes componentes ativas em cada ligação referenciadas no quadro 6.1 do EC3:1-8, de modo a obter uma representação correta do comportamento mecânico:

- 1 – Painel de alma de coluna solicitado ao corte;
- 2 – Alma da coluna em compressão transversal;
- 3 – Alma de coluna em tração transversal;
- 4 – Banzo de coluna em flexão;
- 5 – Chapa de extremidade em flexão;
- 6 – Cantoneira de banzo em flexão;
- 7 – Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão;
- 8 – Alma de viga à tração;
- 9 – Chapa à tração ou compressão;
- 10 – Parafusos à tração;
- 11 – Parafusos ao corte;
- 12 – Parafusos em esmagamento;
- 13 – Betão à compressão;
- 14 – Chapa de base de coluna em flexão sob a ação de compressão;
- 15 – Chapa de base de coluna em flexão sob a ação de tração;
- 16 – Chumbadouros à tração;
- 17 – Chumbadouros ao corte;
- 18 – Chumbadouros ao esmagamento
- 19 – Soldaduras;
- 20 – Esquadro de reforço de viga.

Após a montagem do modelo mecânico da ligação e o cálculo das rigidezes das respectivas componentes, é possível estimar a rigidez inicial da ligação, $S_{j,ini}$, através das expressões indicadas nos pontos 6.3.1 e 6.3.3.1 do EC3: 1-8. Esta rigidez corresponde ao declive inicial da aproximação da curva momento-rotação, a qual pode ser obtida de acordo com o ponto 5.1.2 do EC3: 1-8. A classificação das juntas como rígidas, semi-rígidas ou articuladas pode ser feita conforme o ponto 5.2.2 do mesmo documento.

Em suma, o método das componentes pode ser dividido em duas partes, ambas compostas por várias fases de avaliação, [12] e [8]:

- 1 – Cálculo da resistência da ligação:
 - Representação esquemática da ligação e das trajetórias das forças que se desenvolvem devido à transmissão de esforços entre os elementos ligados;
 - Identificação das componentes ativas e do tipo de solicitação (tração, corte, flexão ou compressão) imposto sobre cada uma destas componentes e avaliação da respetiva resistência;
 - Identificação da componente menos resistente de cada “linha de forças”, pois a magnitude da força desenvolvida em cada linha não pode ultrapassar o respetivo valor resistente;
 - Redistribuição das forças desenvolvidas, garantindo o equilíbrio de forças horizontais e a maximização do momento resistente.
- 2 – Cálculo da rigidez da ligação:
 - Representação esquemática da ligação e identificação das componentes ativas;
 - Avaliação da rigidez característica de cada componente;
 - Montagem do modelo mecânico representando as componentes como molas deformáveis axialmente, dispostas em série ou em paralelo;
 - Cálculo da rigidez rotacional inicial da ligação, $S_{j,ini}$, e da respetiva capacidade de rotação, ϕ_{Cd} ;
 - Classificação da ligação quanto à sua rigidez.

2.2 – Análise do comportamento das componentes

À semelhança do comportamento global de uma ligação, o comportamento particular de cada componente é também caracterizado por uma curva força-deformação que pode ser aproximada por uma curva bilinear.

Após vários estudos de natureza experimental ou numérica, foi possível quantificar o comportamento de todas as componentes que constituem uma ligação e, consequentemente, catalogá-las em três classes diferentes, [12] e [8]:

- Componentes de ductilidade elevada;
- Componentes de ductilidade limitada;
- Componentes frágeis.

2.2.1 – Componentes de ductilidade elevada

As componentes de ductilidade elevada distinguem-se por terem um comportamento elástico inicial, atingindo a plastificação caso seja ultrapassado um determinado patamar de tensão (tensão de cedência). Quando uma componente deste tipo entra em regime plástico, a sua rigidez, K_p , diminui, apesar de continuar com um valor positivo (ver Figura 2.5). A capacidade de deformação destes elementos é considerada virtualmente ilimitada, [12].

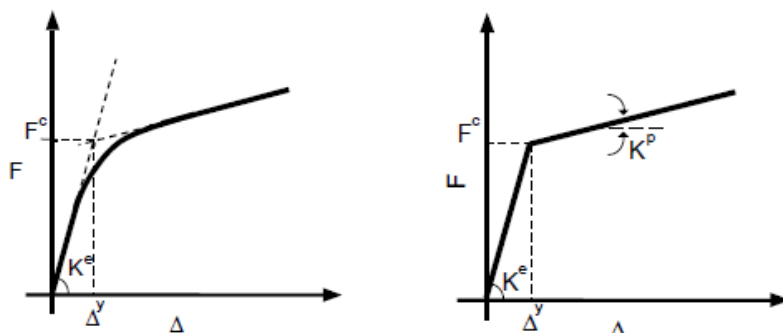


Figura 2.5: Curva força-deformação de uma componente de ductilidade elevada e respetiva aproximação bilinear, [8]

K^e – Rigidez em regime elástico

Δ^y – Deformação de cedência

K^p – Rigidez em regime plástico

F^c – Força de cedência

As componentes de ductilidade elevada existentes nos casos de estudo analisados no presente trabalho são:

- Painel de coluna solicitado ao corte;
- Banzo de coluna em flexão;
- Chapa de extremidade à flexão;
- Alma de viga à tração.

2.2.2 – Componentes de ductilidade limitada

Tal como as componentes de ductilidade elevada, estas componentes apresentam um comportamento elástico inicial na curva força-deformação e em seguida um comportamento plástico. Contudo a rigidez plástica destas componentes atinge valores negativos (ver Figura 2.6), o que significa que em regime plástico as deformações podem aumentar mesmo com uma diminuição da força aplicada. Estas componentes atingem o colapso quando é ultrapassada uma determinada deformação característica, Δ^f , [12].

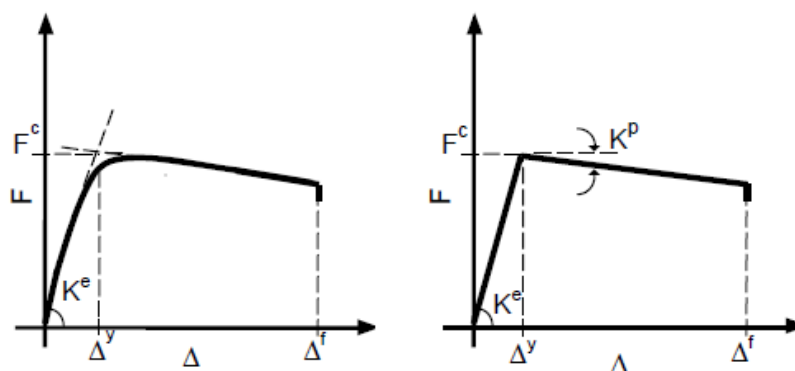


Figura 2.6: Curva força-deformação de uma componente de ductilidade limitada e respetiva aproximação bilinear, [12]

No âmbito deste trabalho, as componentes que apresentam este comportamento são no âmbito:

- Alma do pilar em tração transversal;
- Alma do pilar em compressão transversal;
- Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão.

2.2.3 – Componentes frágeis

Estas componentes atingem a rotura antes de atingir o regime plástico, sendo portanto apenas caracterizadas pela rigidez elástica, K^e , e pela deformação de colapso, Δ^f (ver Figura 2.7), [12].

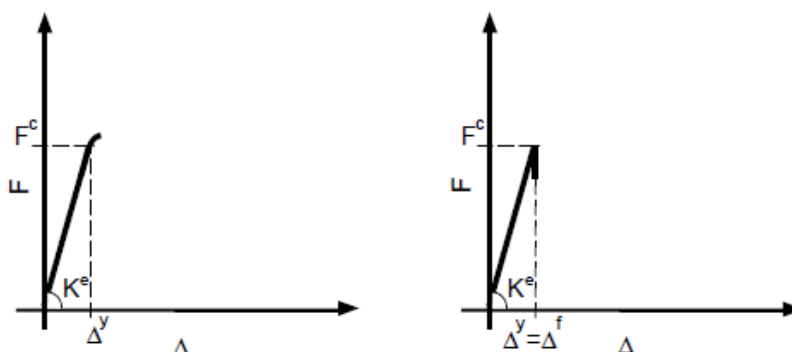


Figura 2.7: Curva força-deformação de uma componente frágil elevada e respetiva aproximação bilinear, [12]

Dentro desta categoria, incluem-se apenas os parafusos submetidos ao corte ou à tração como componentes relevantes para este trabalho.

2.3 – Elementos tracionados em T equivalente

2.3.1 – Considerações gerais

Antes de proceder ao cálculo dos valores resistentes de todos os elementos que compõem uma ligação aparafusada, é necessário compreender os seus modos de rotura. As componentes que se encontram em flexão (banzo do pilar, chapa de extremidade, cantoneira) podem atingir a rotura de várias formas diferentes, as quais por sua vez irão influenciar outras componentes (alma do pilar à tração e alma da viga à tração).

Os modos de rotura destas componentes podem ser representados esquematicamente por uma peça em T denominada no EC3 por “peça em T equivalente tracionada” (ver Figura 2.8). O banzo desta peça representa a componente em flexão (banzo do pilar, cantoneira ou chapa de testa) enquanto a alma representa a componente em tração (alma do pilar ou alma da viga).

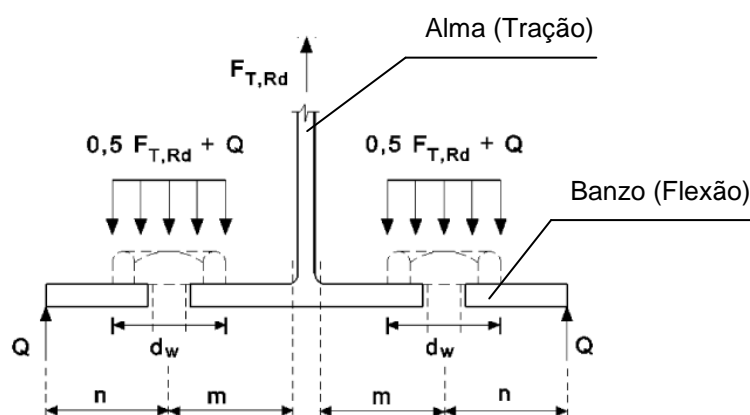


Figura 2.8: Peça em T equivalente tracionada, [4]

2.3.2 – Modos de rotura

1º Modo de Rotura (Figura 2.9): É caracterizado pela rotura do banzo da peça em T através da formação de rotulas plásticas nas linhas de parafusos e na intersecção da alma com o banzo, sendo a espessura do banzo o fator condicionante. Admite-se que as “forças de alavanca”, Q, podem atingir o seu valor máximo.

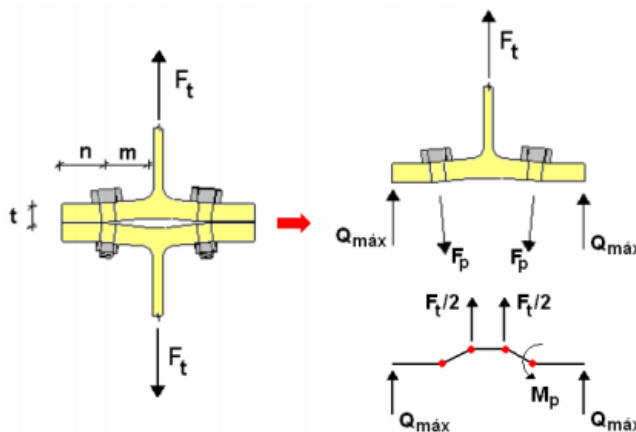


Figura 2.9: 1º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]

2º Modo de Rotura (Figura 2.10): Rotura dos parafusos e do banzo da peça em simultâneo. As rótulas plásticas formam-se na intersecção da alma da peça em T com o banzo respetivo.

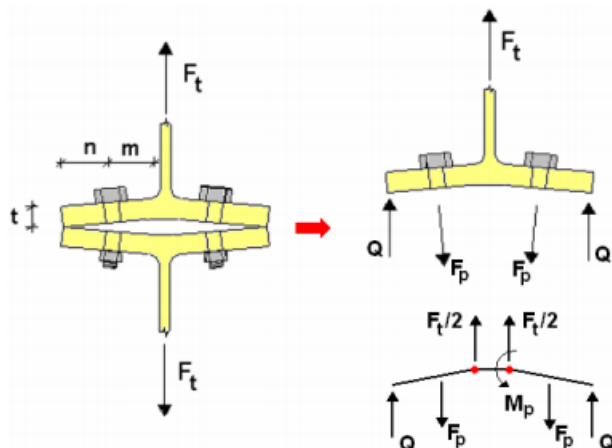


Figura 2.10: 2º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]

3º Modo de Rotura (Figura 2.11): Quando a deformabilidade do banzo é muito inferior à dos parafusos, admite-se que a rotura destes decorre sem formação de rótulas plásticas no banzo. Assim, os elementos condicionantes para este modo de rotura são os parafusos.

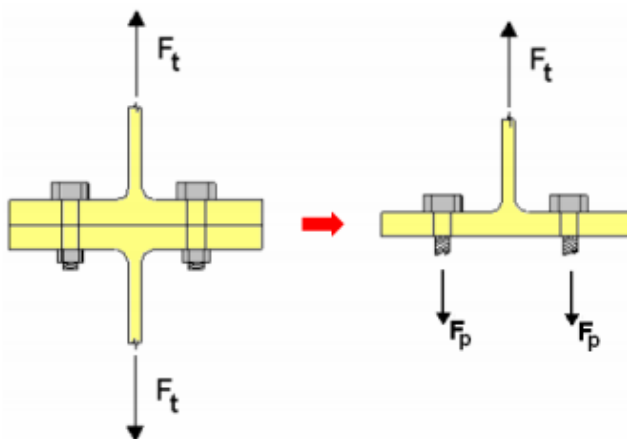


Figura 2.11: 3º Modo de Rotura de uma peça em T equivalente, [7]

As forças de tração resultantes, F_t , podem ser calculadas através das expressões, indicadas no quadro 2.1.

Assim, para que o equilíbrio de forças no banzo em T equivalente seja mantido, a força de tração máxima atuante na alma da peça é dada pelo quadro 2.1. Em que para o método 1 considera-se que os parafusos transmitem as forças de tração sob a forma de cargas concentradas e para o método dois considera-se que as forças de tração são distribuídas ao longo das anilhas dos parafusos.

Quadro 2. 1: Valor resistente do banzo da peça em T equivalente tracionada, [4]

	Ocorrência de forças de alavanca		Sem forças de alavanca
Modo 1	Método 1	Método 2	
Sem contrachapas	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Com contrachapas	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$	
Modo 2	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n}$		
Modo 3	$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$		

Onde:

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_0 \quad (2.1)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_0 \quad (2.2)$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_p^2 f_{y,bp} / \gamma_0 \quad (2.3)$$

$$n = e_{min} \leq 1,25m \quad (2.4)$$

$$e_w = \frac{d_w}{4} \quad (2.5)$$

$F_{T,Rd}$ – Valor resistente do banzo de uma peça em T equivalente à tração;

$F_{t,Rd}$ – Resistência de um parafuso à tração;

$f_{y,bp}$ – Tensão de cedência das contrachapas;

t_{bp} – Espessura das contrachapas;

d_w – Diâmetro da anilha do parafuso;

$\sum l_{eff,1}$ e $\sum l_{eff,2}$ – Somatório dos comprimentos efetivos do banzo da peça em T para os modos de rotura 1 e 2, respetivamente.

Os parâmetros geométricos, e_{min} , m , e t_f , estão representados na Figura 2.12.

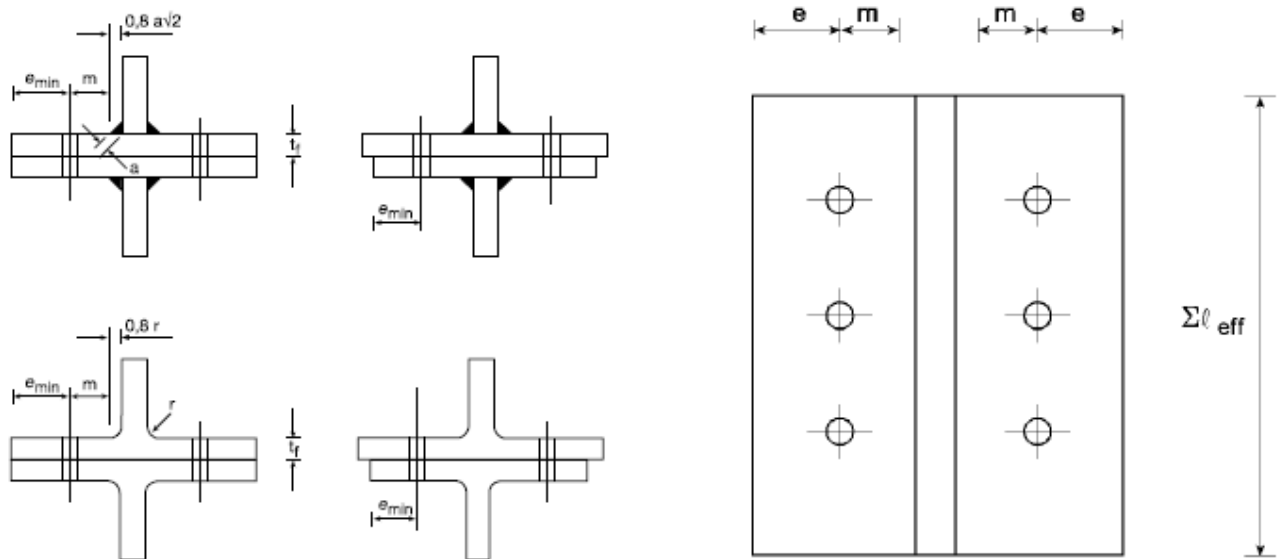


Figura 2.12: Parâmetros geométricos da peça em T equivalente, [4]

A existência de forças de alavanca é verificada através da seguinte condição:

$$l_b \leq l_b^* \quad (2.6)$$

Em que:

l_b – Comprimento do parafuso suscetível a alongamento. Considera-se que este comprimento é igual ao comprimento de aperto (soma da espessura total das chapas e das anilhas) acrescentado de metade da altura da cabeça e da porca do parafuso. Estes valores podem ser obtidos em [2].

$$l_b^* = \frac{(8,8m^3 A_s n_b)}{\Sigma l_{eff,1} t_f^3} \quad (2.7)$$

n_b – Número de linhas de parafusos

2.3.3 – Linhas de parafusos isoladas ou como parte de um grupo

Quando se trata de uma componente que é calculada através do modelo em T equivalente, existem as possibilidades de que a respetiva linha de parafusos esteja a atuar como uma linha isolada ou como parte de um grupo de linhas de parafusos (figura 2.13).

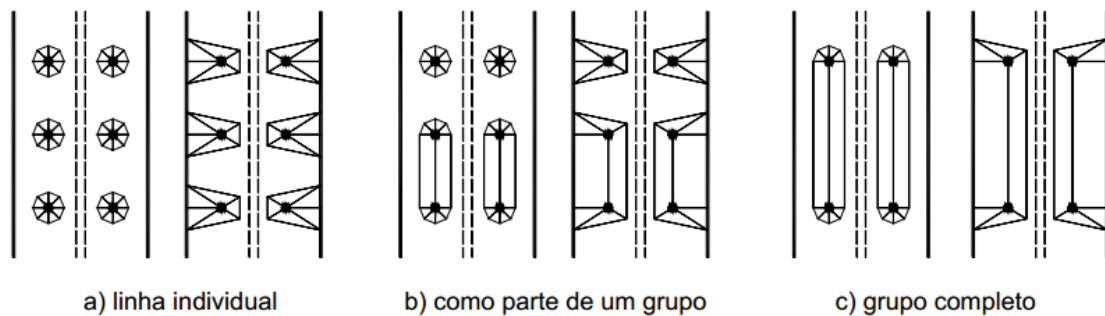


Figura 2.13: Linhas de parafusos atuando isoladamente ou em grupo, [9]

Para ter em conta que a contribuição de uma linha de parafusos isolada para a resistência de uma ligação à flexão é diferente da contribuição da mesma linha quando esta faz parte de um grupo de várias linhas de parafusos, a metodologia adotada pelo [10] para quantificar a resistência de cada linha de parafusos consiste nos seguintes passos:

- A resistência de cada linha de parafusos é calculada individualmente, começando pela linha mais afastada do centro de compressão (a 1ª linha), passando depois para a seguinte e assim sucessivamente;
- As linhas que se encontram mais próximas do centro de compressão do que a linha que está a ser analisada, são desprezadas. Logo a resistência da 1ª linha é tomada como o valor desta linha isolada.
- As restantes linhas são avaliadas como isoladas e como parte de um grupo formado com as linhas mais afastadas do centro de compressão, sendo adotado o valor de resistência correspondente ao caso mais gravoso.

$$P_{r,n} = \min \left(P_{r,n,iso}; P_{r,n-1,n} - P_{r,n-1}; \dots; P_{r,n,m} - \sum_{i=m}^{n-1} P_{r,i} \right) \quad (2.8)$$

$P_{r,n}$ – Valor resistente da linha n .

$P_{r,n,iso}$ – Valor resistente da linha n isolada.

$P_{r,n,m}$ – Valor resistente do grupo de parafusos que vai da linha m até à linha n .

- As linhas que se encontram por baixo do banzo da viga ou de uma chapa de reforço do banzo do pilar não fazem grupo com as de cima e vice-versa, pois consta-se que estes elementos atuam como “divisores”.

Obtém-se assim a distribuição de forças para um momento fletor atuante negativo esquematizada na Figura 2.14.

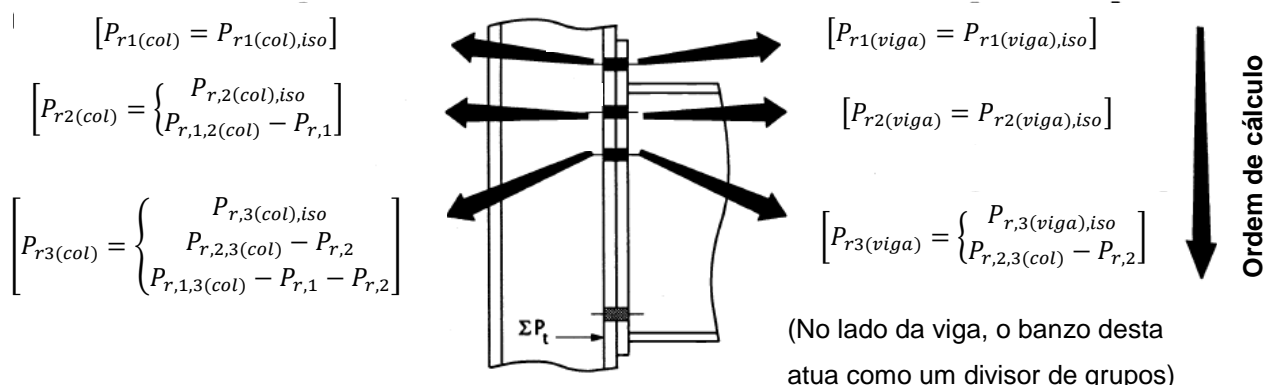


Figura 2.14: Distribuição de forças numa ligação aparafusada, [10]

2.4 – Resistência das componentes essenciais

Neste capítulo serão apenas abordadas as resistências das componentes existentes nos casos de estudo analisados neste trabalho (ligações viga pilar com chapa de extremidade).

2.4.1 – Alma do pilar solicitada ao esforço transversal

2.4.1.1 – Alma do pilar não reforçada

De acordo com o ponto 6.2.6.1 do [4], para uma ligação pilar-viga com viga só de um lado ou com vigas em ambos os lados mas com alturas semelhantes, a resistência de cálculo da alma do pilar ao esforço transversal é dada pela seguinte expressão:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.9)$$

Em que:

γ_{M0} – Coeficiente de segurança à cedência de secções = 1;

$f_{y,wc}$ – Tensão de cedência da alma da coluna;

A_{vc} – Área resistente ao corte da alma da coluna, dada por [3] e [8]:

- Perfis laminados em H ou I:

$$A_{vc} = A_c - 2b_c t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c)t_{fc} \quad (2.10)$$

Onde:

A_c – Área da secção transversal da coluna;

t_{fc} – Espessura do banzo da coluna;

t_{wc} – Espessura da alma da coluna;

r_c – Raio de concordância da coluna;

b_c – Largura do banzo da coluna.

Note-se que esta expressão só pode ser utilizada caso seja respeitada a seguinte condição:

$$d_c/t_{wc} \leq 69\varepsilon \quad (2.11)$$

Em que:

h_c – Altura da secção da coluna

d_c – Distância entre os banzos do pilar, excluindo os raios de concordância

- Para perfis H ou I laminados:

$$d_c = h_c - 2(t_{fc} + r_c) \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2.13)$$

2.4.1.2 – Alma do pilar reforçada com chapa de alma

Para aumentar a área de corte da alma do pilar, pode ser adicionada uma chapa metálica de um ou dos dois lados da alma (ver Figura 2.15). Assim, a área de corte terá um acréscimo de $b_s t_{wc}$, independentemente de ser reforçada em apenas um lado ou nos dois lados da alma do pilar.

Contudo, a chapa de reforço deve respeitar as seguintes condições:

- A sua largura, b_s , deve ser prolongada até ao início do raio de concordância ou da soldadura;
- A classe da chapa de reforço deverá ser igual à do pilar;
- O comprimento da chapa, l_s , deve incluir o comprimento efetivo da alma da coluna à tração e à compressão transversal;
- A espessura da chapa, t_s , deve ser maior ou igual que a da alma do pilar;
- A largura da chapa não deve ser superior a $40\epsilon t_s$.

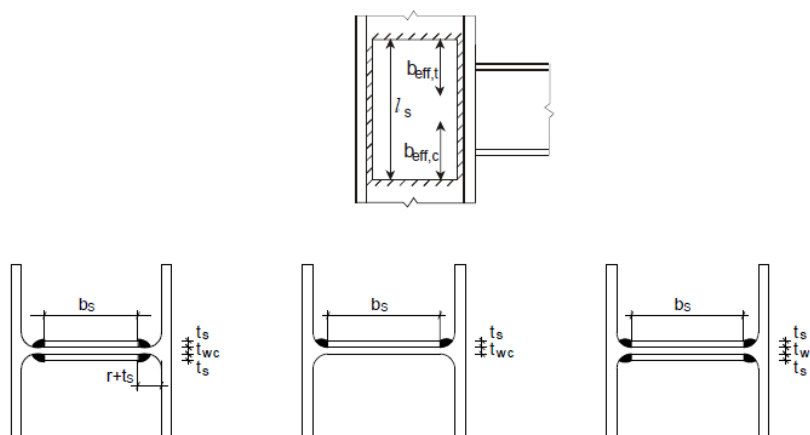


Figura 2.15: Exemplos de reforço da alma do pilar, [4]

2.4.1.3 – Alma do pilar reforçada com chapas transversais, solicitada ao esforço transversal

Caso sejam adicionados reforços transversais (ver figura 2.16) ao pilar na zona de compressão e de tração em simultâneo, deve ser adicionado o valor de $V_{wp,add,Rd}$ à resistência da alma do pilar ao esforço transversal.

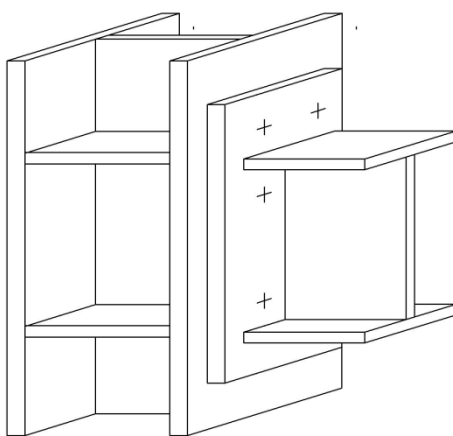


Figura 2.16: Junta com reforços transversais no pilar

O valor de $V_{wp,add,Rd}$ é dado por:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s} \quad (2.14)$$

Em que:

$M_{pl,fc,Rd}$ – Momento resistente do banzo do pilar em regime plástico;

$M_{pl,st,Rd}$ – Momento resistente do reforço transversal do pilar em regime plástico;

d_s – Distância entre os centros geométricos dos reforços transversais.

O momento resistente plástico, tanto do banzo do pilar como do reforço transversal é dado pelo modulo plástico de flexão da respetiva peça multiplicado pela tensão de cedência.

O modulo plástico de flexão de ambas as peças é pois dado por:

$$w_{pl} = \frac{bt^2}{4} \quad (2.15)$$

b – Largura do bazo do pilar ou do reforço transversal;

t – Espessura do bazo do pilar ou do reforço transversal.

2.4.2 – Alma do pilar sujeita a compressão transversal

A compressão transversal a que é sujeita a alma de um pilar deve-se à existência de tensões de compressão na zona inferior da viga provocadas por um momento fletor negativo. Admite-se que estas tensões são transmitidas para o pilar sob a forma de uma carga horizontal concentrada no banzo da viga (ver figura 2.17), [8].

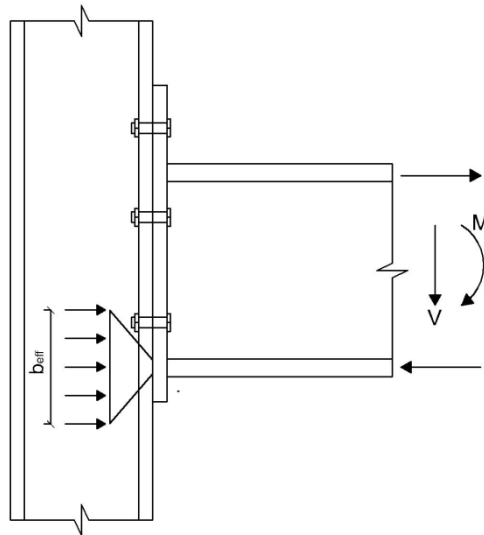


Figura 2.17: Alma de coluna em compressão transversal

Esta força é dada por, de acordo com o ponto 6.2.6.2 do [4]:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (2.16)$$

Onde:

ω – Coeficiente de redução indicado no Quadro 2.2, de modo a contabilizar os efeitos da interação com o esforço transversal atuante na coluna.

β – Parâmetro de transformação obtido através do quadro 2.3. O seu valor varia conforme o número de ligações no pilar e a razão entre os momentos atuantes de cada lado.

k_{wc} – Coeficiente de redução dependente da tensão de compressão longitudinal máxima na alma do pilar, $\sigma_{com,Ed}$, devida ao esforço axial e ao momento atuante.

$$\bullet \text{ Se } \sigma_{com,Ed} \leq 0,7 f_{y,wc} \rightarrow k_{wc} = 1 \quad (2.17)$$

$$\bullet \text{ Se } \sigma_{com,Ed} \geq 0,7 f_{y,wc} \rightarrow k_{wc} = 1,7 - \frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{y,wc}} \quad (2.18)$$

γ_{M1} – Coeficiente de segurança à encurvadura =1;

ρ – Coeficiente de redução para contabilizar a encurvadura da chapa.

$$\bullet \text{ Se } \bar{\lambda}_p \leq 0,72: \rho = 1,0 \quad (2.19)$$

$$\bullet \text{ Se } \bar{\lambda}_p > 0,72: \rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2 \quad (2.20)$$

Em que $\bar{\lambda}_p$ representa a esbelteza da chapa, dada por:

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_c f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (2.21)$$

t_{wc} – Espessura da alma da coluna;

$b_{eff,c,wc}$ – Comprimento efetivo da alma da coluna em compressão transversal.

- Ligação aparafusada com chapa de testa:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (2.22)$$

s – No caso de perfis laminados I ou H, é igual ao raio de concordância;

a_p – Espessura do cordão de soldadura que liga o banzo da viga à placa de extremidade;

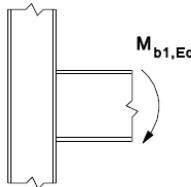
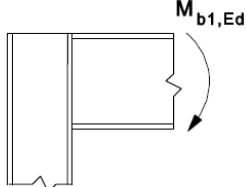
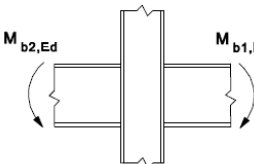
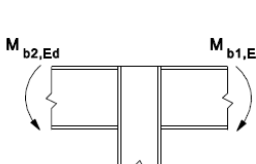
s_p – Comprimento obtido por difusão a 45° na chapa de extremidade, [4].

O comprimento s_p tem no mínimo o valor da espessura da chapa de extremidade, t_p , e no máximo $2t_p$, desde que o comprimento da chapa de extremidade para além do banzo inferior da viga seja superior a $2t_p$.

Quadro 2.2: Coeficiente de redução ω , [4]

Parâmetro de transformação β	Coeficiente de redução ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{\text{eff,c,wc}} t_{\text{wc}} / A_{\text{vc}})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{\text{eff,c,wc}} t_{\text{wc}} / A_{\text{vc}})^2}}$
A_{vc} área de corte da coluna, ver 6.2.6.1; β parâmetro de transformação, ver 5.3(7).	

Quadro 2.3: Parâmetro de transformação β , [4]

Tipo de configuração da junta		Acção	Valor de β
		$M_{b1,Ed}$	$\beta \approx 1$
		$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	$\beta = 0$ ^{*)}
		$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$	$\beta \approx 1$
		$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$	$\beta \approx 2$
		$M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$	$\beta \approx 2$
^{*)} Neste caso, o valor de β é o valor exacto e não um valor aproximado.			

No caso de uma coluna com uma chapa de alma de reforço, a espessura efetiva da alma do pilar pode ser considerada igual a $1,5t_{\text{wc}}$ ou $2t_{\text{wc}}$, conforme esta se encontre reforçada de um ou dos dois lados. A área de corte ponderada, A_{vc} , respeita os mesmos limites impostos no capítulo 2.4.1.2.

Para contabilizar os efeitos de um eventual reforço transversal nesta componente pode ser adicionado o valor do reforço à compressão ao valor resistente da alma da coluna à compressão transversal. Caso o reforço não seja demasiado esbelto, o cálculo da respetiva resistência à compressão pode ser feito de acordo com o ponto 6.2.3 do [3].

$$N_{\text{pl,st,Rd}} = \frac{A_{\text{st}} f_{\text{y,st}}}{\gamma_{\text{M0}}} \quad (2.23)$$

Onde:

$N_{pl,st,Rd}$ – Resistência plástica do reforço transversal à compressão;

A_{st} – Área efetiva do reforço transversal à compressão;

$f_{y,st}$ – Tensão de cedência do reforço transversal.

2.4.3 – Alma do pilar sob tração transversal

A resistência da alma do pilar à tração transversal pode ser determinada de acordo com a seguinte expressão, [4]:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (2.24)$$

No caso de uma ligação aparafusada, a largura efetiva, $b_{eff,t,wc}$, é considerada igual ao comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão, sendo necessário considerar que as linhas de parafusos podem atuar isoladamente ou em grupos, de acordo com a metodologia descrita no capítulo 2.3.3.

Quando se trata de uma coluna reforçada por uma chapa na alma, a área de corte, A_{vc} , respeita mais uma vez as condições impostas no ponto 2.4.1.2. Contudo, a espessura efetiva da alma varia entre os seguintes valores:

- Cordão da soldadura longitudinal da chapa de alma com penetração total e com espessura $a \geq t_s$:

- Chapa de alma em apenas um lado:

$$t_{w,eff} = 1,5 t_{wc} \quad (2.25)$$

- Chapas de alma em ambos os lados:

$$t_{w,eff} = 2 t_{wc} \quad (2.26)$$

- Cordão da soldadura longitudinal da chapa de alma de ângulo e com espessura $a \geq t_s/\sqrt{2}$:

- Para aços de classe S235, S275 e S355:

$$t_{w,eff} = 1,4 t_{wc} \quad (2.27)$$

- Para aços de classe S420 e S460:

$$t_{w,eff} = 1,3 t_{wc} \quad (2.28)$$

2.4.4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

No caso de ligações aparafusadas, a resistência do banzo do pilar sujeito à flexão transversal é calculada através do modelo T equivalente, cuja formulação se encontra resumida no Quadro 2.1. É necessário considerar os três modos de rotura descritos no ponto 2.3.2 e seguir a metodologia do ponto 2.3.3, de forma a ponderar as possibilidades das linhas de parafusos atuarem em grupo ou isoladamente.

O valor do comprimento efetivo total, $\sum l_{\text{eff}}$, não depende só dos fatores geométricos da ligação, pois varia também consoante o banzo se encontra reforçado ou não. Como tal o [4] dispõe de um subcapítulo destinado a cada uma das seguintes situações:

a) Banzo do pilar não reforçado

No quadro 2.4 apresentam-se as expressões de cálculo do comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão. Estas diferem de acordo com a posição da linha de parafusos (linha de extremidade, linha interior, etc...), com o padrão do comprimento efetivo, que pode ser circular ou não, e mais uma vez com a possibilidade das linhas de parafusos atuarem em grupo. O modo de rotura 1 é caracterizado pelo menor valor calculado entre o padrão circular e não-circular, enquanto que o modo 2 é sempre caracterizado pelo padrão não circular.

Quadro 2.4: Comprimento efetivo do banzo do pilar não reforçado à flexão transversal, [4]

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada isoladamente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas	
	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
Linha de parafusos interior	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha de parafusos de extremidade	O menor dos valores: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	O menor dos valores: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	O menor dos valores: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	O menor dos valores: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Modo 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff,nc}}$ mas $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff,cp}}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff,nc}}$ mas $\sum l_{\text{eff},1} \leq \sum l_{\text{eff,cp}}$	
Modo 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff,nc}}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff,nc}}$	

e_1 – Distância entre a linha de parafusos e a extremidade do pilar na direção longitudinal deste;

p – Distância entre duas linhas de parafusos (figura 2.20).

Os restantes parâmetros relevantes para a determinação do comprimento efetivo do banzo do pilar encontram-se indicados na Figura 2.18.

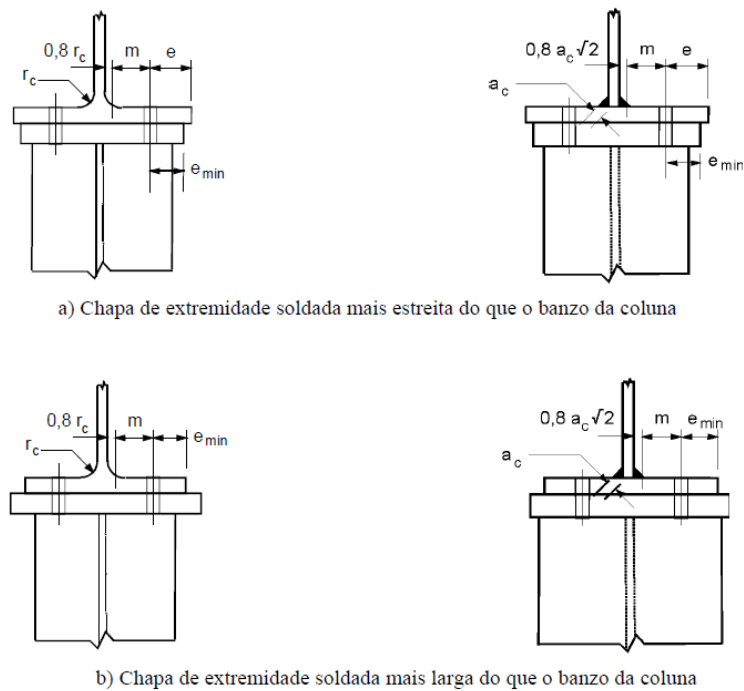


Figura 2.18: Dimensões geométricas do banzo de um pilar, [4]

b) Banzo do pilar reforçado, ponto 6.2.6.4.2 do [4]:

Quando a resistência do banzo do pilar à flexão é condicionante na verificação de segurança da ligação, podem ser adicionados reforços transversais (ver figura 2.16) ou diagonais dispostos de forma apropriada.

Estes reforços, para além de aumentarem a resistência do banzo, também funcionam como divisores de conjuntos de linhas de parafusos, como foi referido no ponto 2.3.3. Assim, devem ser consideradas duas peças em T equivalente separadas, uma para os parafusos situados acima do reforço e outra para os parafusos abaixo do reforço. Para esta situação o cálculo do comprimento efetivo é feito de acordo com o quadro 2.5.

Quadro 2.5: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão com reforços transversais, [4]

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada isoladamente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas	
	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
Linha de Parafusos adjacente a um reforço	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Outra Linha de parafusos interior	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Outra Linha de parafusos de extremidade	O menor dos valores: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	O menor dos valores: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	O menor dos valores: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	O menor dos valores: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Linha de extremidade adjacente a um reforço	O menor dos valores: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	Não aplicável	Não aplicável
Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

Onde α é obtido através do ábaco da Figura 2.19.

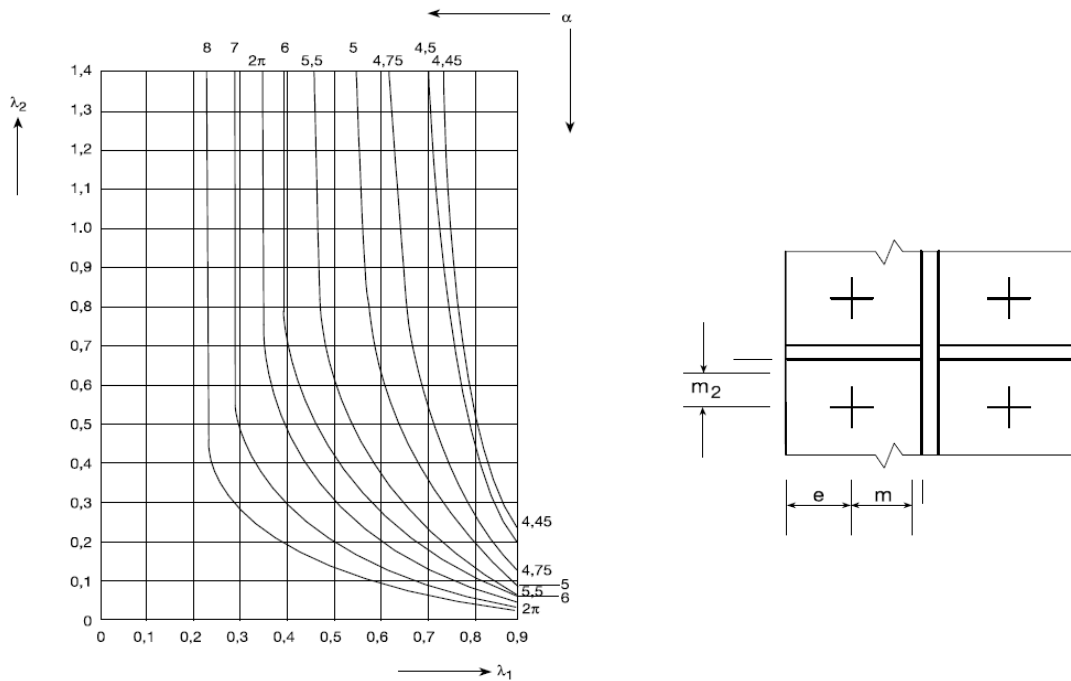


Figura 2.19: Valores de α para banzos reforçados de colunas e para chapas de extremidade, [4].

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} \quad (2.29)$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m + e} \quad (2.30)$$

2.4.5 – Chapa de extremidade à flexão

Visto que a chapa de extremidade sujeita à flexão tem um comportamento análogo ao do banzo do pilar, o método de cálculo destas componentes é muito semelhante. Assim, os pressupostos e formulação de uma peça em T equivalente apresentados no capítulo 2.3 são também aplicáveis a este elemento. Contudo a determinação do comprimento total efetivo, $\sum b_{\text{eff}}$, difere um pouco da anterior, como se pode observar no quadro 2.6, [4].

Quadro 2.6: Comprimentos efetivos de uma chapa de extremidade à flexão, [4]

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada isoladamente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas	
	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
Linha de parafusos na parte saliente do banzo tracionado da viga	O menor dos valores: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	O menor dos valores: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
1ª linha de parafusos sob o banzo tracionado da viga	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Outra Linha de parafusos interior	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Outra Linha de parafusos, de extremidade	O menor dos valores: $2\pi m$	O menor dos valores: $4m + 1,25e$	O menor dos valores: $\pi m + p$	O menor dos valores: $2m + 0,625e + 0,5p$
Modo 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff,nc}}$ mas $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff,cp}}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff,nc}}$ mas $\sum l_{\text{eff},1} \leq \sum l_{\text{eff,cp}}$	
Modo 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff,nc}}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff,nc}}$	

α – Parâmetro obtido a partir da Figura 2.19

Os valores de m_x , e_x , b_p , p e e estão representados nas figuras 2.20, estando m indicado na Figura 2.8 e 2.12.

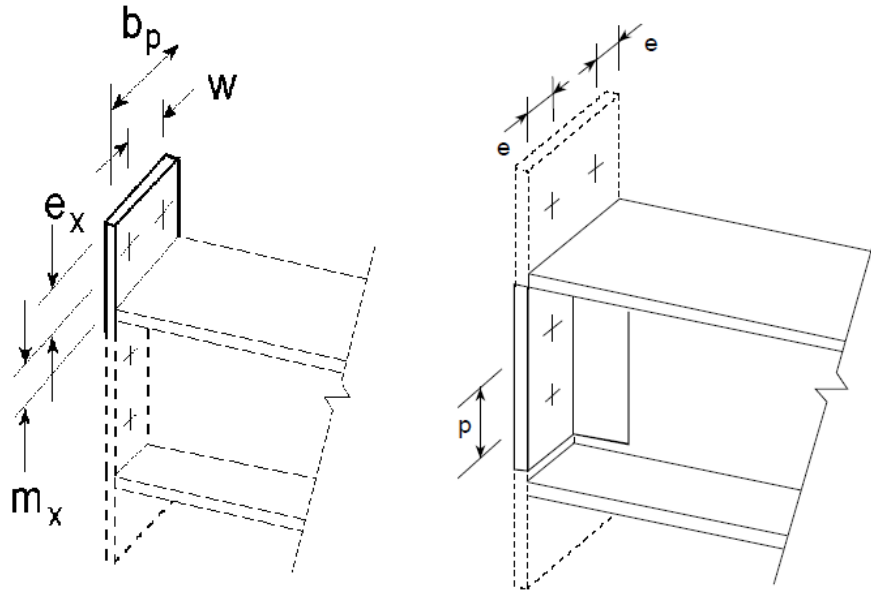


Figura 2.20: Parâmetros geométricos de uma chapa de extremidade, [4]

2.4.6 – Banzo e Alma da viga em compressão

As tensões de compressão incidentes na alma e banzo da viga resultam naturalmente do momento atuante. Como consequência, é espectável que a resistência destes elementos à compressão seja dependente do momento resistente da viga. Admitindo que a tensão de compressão pode ser representada por uma força resultante localizada no centro de compressão, a resistência desta componente pode ser calculada pela seguinte expressão, [4]:

$$F_{c,fb,Rd} = M_{b,Rd} / (h_b - t_{fb}) \quad (2.31)$$

$M_{b,Rd}$ – Momento resistente da viga;

t_{fb} – Espessura do banzo da viga;

h_b – Altura da viga.

O momento resistente de um perfil metálico é calculado segundo o ponto 6.2.5 do [3]. No caso de perfis de classe 1 e 2, em que a distribuição de tensões segue um regime plástico, é utilizada a seguinte expressão:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.32)$$

W_{pl} – Módulo plástico do perfil;

f_y – Tensão de cedência;

γ_{M0} – Coeficiente de segurança à cedência das secções = 1.

Contudo, caso o esforço transversal atuante, V_{Ed} , seja superior a metade do esforço transversal resistente plástico do perfil, $V_{c,Rd}$, o momento resistente da viga deverá ser devidamente reduzido de acordo com o [3]. Esta situação não é abordada neste trabalho.

2.4.7 – Alma de viga em tração

Tratando-se de uma ligação aparafusada, o valor resistente desta componente é dada pela seguinte expressão, [3]:

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (2.33)$$

Mais uma vez é necessário adotar a metodologia do capítulo 2.3.3, pois esta componente é modelada de modo idêntico à alma de uma peça em T equivalente. A largura efetiva, $b_{eff,t,wb}$, é igual ao comprimento efetivo da placa de extremidade ou cantoneira à flexão.

2.4.8 – Parafusos à tração

A rotura dos parafusos devida à tração corresponde ao modo de colapso 3 do modelo T equivalente. Logo é necessário mais uma vez ter em conta as condições referenciadas no capítulo 2.3.3.

A resistência desta componente é dada pelo somatório da resistência à tração individual de todos os parafusos que perfazem a linha de parafusos isolada ou grupo de linhas de parafusos.

A resistência individual de cada parafuso pode ser calculada pela seguinte expressão, [4]:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (2.34)$$

f_{ub} – Tensão de rotura do parafuso;

A_s – Área da secção resistente do parafuso;

γ_{M2} – Coeficiente de segurança para ligações = 1,25;

k_2 – Coeficiente que para parafusos regulares considera-se igual a 0,9.

2.4.9 – Resistência ao punçoamento

Apesar desta componente não estar presente no quadro 6.1 do [4] e de não influenciar a rigidez da ligação, é necessário verificar se a resistência da chapa de testa e do banzo do pilar ao punçoamento são condicionantes na determinação do momento resistente da ligação.

A expressão de cálculo desta componente encontra-se no [4]:

$$B_{p,Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \quad (2.35)$$

Onde:

d_m – Largura da cabeça do parafuso ou da porca;

t_p – Espessura da chapa de aço;

f_u – Tensão última da chapa de aço.

2.4.10 – Soldaduras solicitadas à tração ou corte

A resistência dos cordões de soldadura a tensões de corte ou de tração, $f_{vw,d}$, pode ser determinada em conformidade com o [4], do seguinte modo:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (2.36)$$

Em que:

f_u – Tensão de rotura do elemento ligado menos resistente;

β_w – Fator de correlação, obtido no quadro 2.7.

Quadro 2.7: Fator de correlação β_w , [4]

Norma e classe de aço			Factor de correlação β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

A força resistente da soldadura por unidade de comprimento, $F_{w,Rd}$, é dada pela seguinte expressão:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \times a \quad (2.37)$$

Em que:

a – Espessura efetiva do cordão de soldadura (ver figura 2.21).

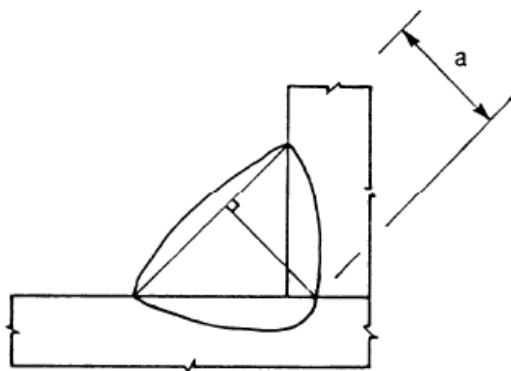


Figura 2.21: Espessura de um cordão de soldadura com elevada penetração, [4].

A resistência total, $F_{W,Rd}$, da soldadura é naturalmente calculada da seguinte forma:

$$F_{W,Rd} = F_{w,Rd} \times l_{w,eff} \quad (2.38)$$

$l_{w,eff}$ – Comprimento efetivo do cordão de soldadura ao corte ou à tração.

2.4.11 – Parafusos ao corte

O valor resistente de cada parafuso individual ao corte, é calculado através da expressão presente no quadro 3.4 do [4]:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (2.39)$$

Em que:

- a) Para classes 4.6, 5.6, 8.8: $\alpha_v = 0,6$;
- b) Para classes 4.8, 5.8, 6.8 e 10.9: $\alpha_v = 0,5$;
- c) Quando a secção de corte intersecta a zona roscada do parafuso, A , é igual à área da secção resistente do parafuso, A_s ;
- d) Quando a secção de corte intersecta a zona não roscada do parafuso, A , é a área bruta da secção transversal do parafuso;
- e) f_{ub} é a tensão de rotura do parafuso.

2.5 – Cálculo do momento resistente da ligação

O cálculo do momento resistente de ligações viga-coluna e de ligações de continuidade está descrito no [4] e resume-se em seguida.

2.5.1 – Verificação de segurança à flexão

O cálculo do momento resistente, $M_{j,Rd}$, é efetuado sem considerar a existência de esforço axial. Assim, verificando-se a condição de que o valor do esforço axial do elemento conectado, $N_{j,Ed}$, é inferior a 5% da respetiva resistência plástica, $N_{pl,Rd}$, considera-se verificada a segurança se:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1 \quad (2.40)$$

Caso o esforço axial atuante no elemento ligado, $N_{j,Ed}$, seja superior a 5% da sua resistência axial plástica, $N_{pl,Rd}$, dever-se-á considerar uma verificação de segurança mais conservadora:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1 \quad (2.41)$$

Em que:

$N_{j,Ed}$ – Esforço axial aplicado na junta;

$N_{j,Rd}$ – Resistência da ligação ao esforço axial, desprezando qualquer momento atuante.

2.5.2 – Momento resistente de uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade

2.5.2.1 – Ligação com apenas uma linha de parafusos à tração

O momento resistente de uma ligação aparafusada com chapa de extremidade e uma única linha de parafusos à tração resulta do binário indicado na figura 2.22, onde F_{Rd} representa o valor resistente da componente mais frágil da ligação:

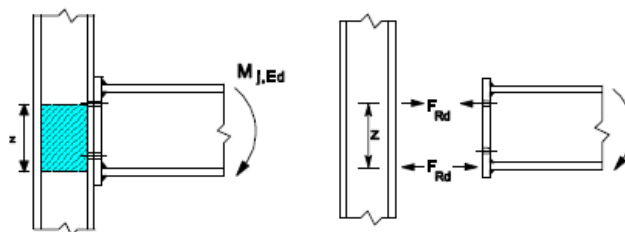


Figura 2.22: Ligação com chapa de extremidade aparafusada apenas com uma linha de parafusos à tração, [4]

Considera-se que o centro de compressão se encontra no centro de gravidade do plano onde se concentram as tensões de compressão. Como simplificação, admite-se que para ligações aparafusadas com chapa de extremidade, o centro de compressão encontra-se geralmente a meio da espessura do banzo inferior da viga.

Neste caso em particular, o braço do binário, z , é igual à distância entre a 1ª linha de parafusos e o centro de compressão.

2.5.2.2 – Ligação com mais do que uma linha de parafusos à tração

Para uma ligação viga-pilar com várias linhas de parafusos à tração, o momento resistente da ligação é calculado através da seguinte expressão, [4]:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (2.42)$$

Onde:

$F_{tr,Rd}$ – Valor de cálculo da resistência à tração efetiva da fiada de parafusos r ;

h_r – Distância entre a linha de parafusos r e o centro de compressão;

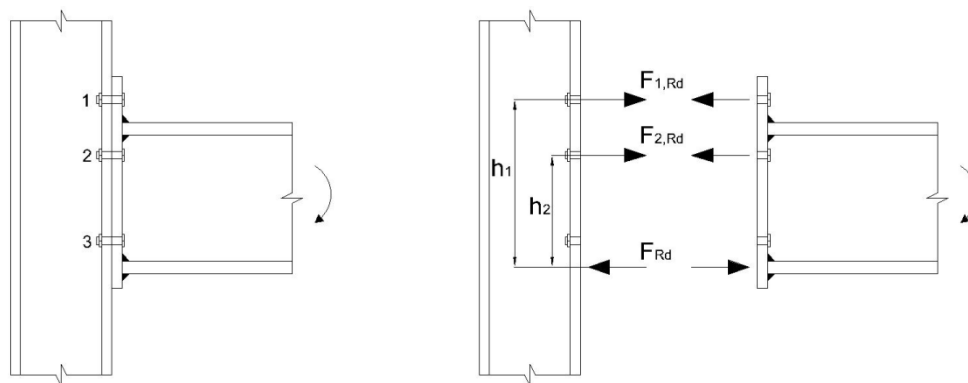


Figura 2.23: Modelo simplificado de uma ligação com chapa de extremidade e duas linhas de parafusos à tração.

Para garantir o equilíbrio de forças e a maximização do momento resistente é necessário considerar os seguintes pressupostos:

- A soma das forças de tração tem de ser igual à força de compressão;
- No caso da soma das forças de tração ser superior à força de compressão, deve ser reduzido em primeiro lugar a força de tração situada mais próxima do centro compressão e assim sucessivamente.

2.6 – Verificação de segurança ao esforço transversal

A junta verifica a segurança ao esforço transversal caso seja respeitada a seguinte condição:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (2.43)$$

Onde:

V_{Ed} – Esforço transversal atuante na ligação;

V_{Rd} – Resistência da ligação ao esforço transversal.

No caso de ligações aparafusadas com chapa de extremidade, pode considerar-se que a resistência da junta ao esforço transversal é o menor de entre os valores resistentes dos cordões de soldadura e dos parafusos sujeitos ao corte.

De forma simplificada, admite-se que os cordões de soldadura que resistem ao corte são aqueles que não estão a suportar forças de tração.

Para os parafusos que se encontram tracionados é ainda necessário verificar a resistência à combinação de corte com tração:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} + \frac{N_{Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (2.44)$$

Assim, tendo em conta que existem dois parafusos por cada alinhamento, a força máxima de corte correspondente a cada linha de tração é dada por:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \times 2 \times \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \times 2 \times F_{t,Rd}} \right) \quad (2.45)$$

Em que:

V_{Ed} – Força máxima de corte desenvolvida numa linha de tração;

V_{Rd} – Resistência de um parafuso ao corte;

N_{Ed} – Esforço normal atuante (admite-se que é igual à força de tração máxima de cada linha de parafusos);

$F_{t,Rd}$ – Resistência de um parafuso à tração.

2.7 – Cálculo da rigidez de cada componente

O cálculo da rigidez de cada componente pode ser feito com recurso ao quadro 2.8.

Quadro 2.8: Cálculo da rigidez axial das componentes de uma ligação aparafusada com chapa de extremidade, [4]

Componente	Coeficiente de rigidez k_i	
Alma do pilar solicitada ao esforço transversal	Não reforçada Ligação só de um lado ou em ambos os lados com alturas idênticas	Reforçada
	$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z}$	$k_1 = \infty$
	z – Braço do binário. *) β – Parâmetro de transformação indicado no quadro 2.3	
Alma do pilar em compressão transversal	Não reforçada	Reforçada
	$k_2 = \frac{0,7b_{\text{eff},c,wc}t_w}{d_c}$	$k_2 = \infty$
	$b_{\text{eff},c,wc}$ - Comprimento efetivo da alma do pilar em compressão obtido no ponto 2.4.2.	
Alma do pilar em tração	Ligação aparafusada	
	$k_3 = \frac{0,7b_{\text{eff},t,wc}t_w}{d_c}$	
	$b_{\text{eff},t,wc}$ - Comprimento efetivo da alma do pilar à tração. Considera-se o valor mais reduzido obtido no quadro 2.4. Caso o banzo do pilar seja reforçado, deve ser consultado o quadro 2.5.	
Banzo do pilar em flexão	$k_4 = \frac{0,9l_{\text{eff}}^3 t_{fc}^3}{m^3}$	
	l_{eff} - Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão. É obtido da mesma forma que o comprimento efetivo da componente anterior.	
	m – Representado na figura 2.18.	
Chapa de extremidade em flexão	$k_5 = \frac{0,9l_{\text{eff}}^3 t_p^3}{m^3}$	
	l_{eff} - Menor comprimento efetivo obtido no quadro 2.6.	
	m – Representado na figura 2.12. No caso de se tratar de uma linha de parafusos situada na saliência de uma chapa de extremidade considera-se m_x , definido na figura 2.20.	
Parafusos à tração	$k_{10} = 1,6A_s/L_b$	
	L_b – “Comprimento dos parafusos sujeito a alongamento”, ponto 2.3.2.	
*) No caso de ligações aparafusadas com chapa de extremidade com apenas uma fiada de parafusos à tração, considera-se o braço binário da figura 2.22. Caso existam duas ou mais linhas de parafusos à tração, pode-se considerar de forma simplificada que o braço binário vai desde o centro de compressão até meio da espessura do banzo superior da viga, [4].		

As componentes 7 e 8 (banzo da viga à compressão e alma da viga à tração) consideram-se com comportamento rígido-plástico. Logo, o valor da sua rigidez é tomado como infinito.

2.8 – Estimativa da rigidez rotacional de uma ligação

Tome-se como exemplo simplificado a seguinte ligação aparafusada com chapa de extremidade (figura 2.24):

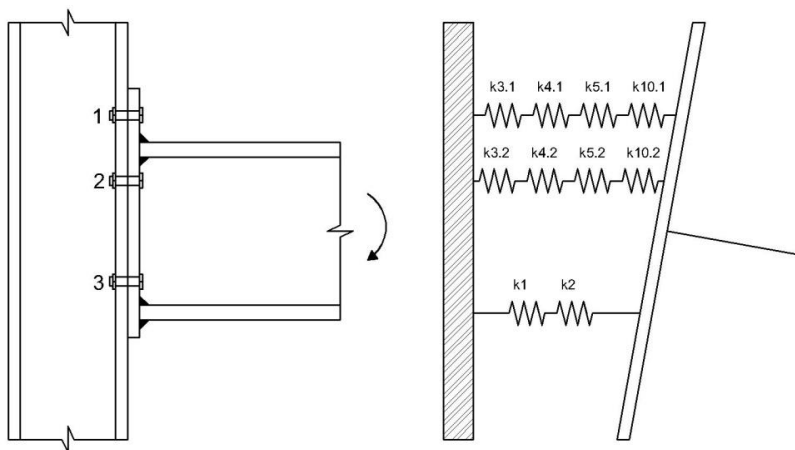


Figura 2.24: Modelo mecânico de uma ligação viga-pilar aparafusada com placa de extremidade

Este modelo pode ser ainda mais simplificado substituindo a rigidez das componentes de cada linha de tração, r , por uma rigidez efetiva, $k_{eff,r}$. Esta rigidez é calculada de acordo com os princípios básicos aplicáveis a molas dispostas em série, [4].

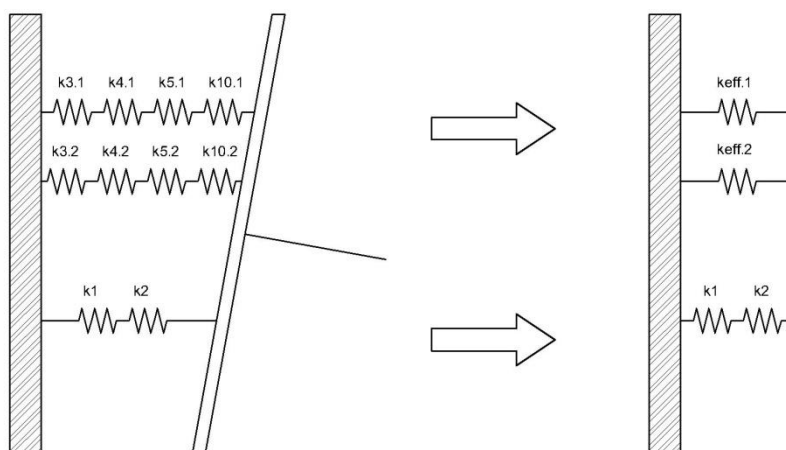


Figura 2. 25: Simplificação do modelo mecânico de uma ligação viga-pilar

Têm-se pois:

$$k_{\text{eff},r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (2.46)$$

Assim, a rigidez efetiva da linha de parafusos 1 da ligação representada na figura 2.25 é calculada da seguinte forma:

$$k_{\text{eff},1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,1}} + \frac{1}{k_{4,1}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{10,1}}} \quad (2.47)$$

Antes do cálculo da rigidez rotacional inicial da ligação (ver figura 2.26) deve ser feita ainda mais uma simplificação do modelo mecânico, substituindo as molas efetivas correspondentes a cada linha de tração por uma única mola com a respetiva rigidez equivalente, k_{eq} , [4].

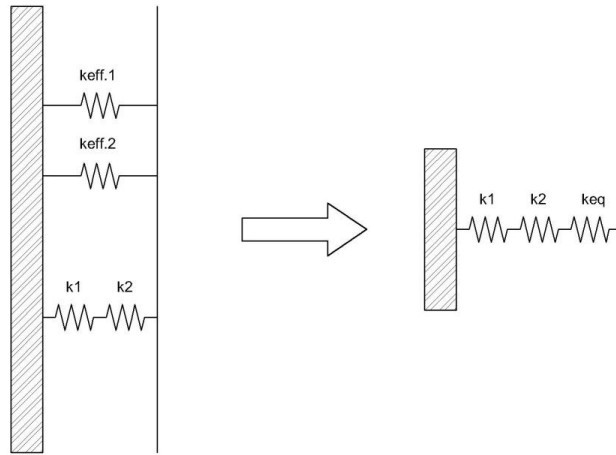


Figura 2. 26: Simplificação adicional do modelo mecânico de uma ligação viga-pilar

A rigidez equivalente é dada pela seguinte expressão:

$$k_{\text{eq}} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r}{z_{\text{eq}}} \quad (2.48)$$

$$z_{\text{eq}} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r^2}{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r} \quad (2.49)$$

Em que:

z_{eq} – Braço do binário equivalente

Finalmente, o cálculo da rigidez de rotação da ligação, S_j , é feito através da seguinte expressão do [4]:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (2.50)$$

Onde:

k_i – Rigidez axial da componente i, do sistema mecânico simplificado

z – Braço do binário (de acordo com o ponto 6.2.7 do [4])

μ – Relação entre a rigidez de rotação e a rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}/S_j$

E – Módulo de elasticidade do aço

É importante ter em conta que a equação 2.48 só é válida para ligações em que o esforço normal atuante no elemento ligado, N_{Ed} , é igual ou inferior a 5% da resistência de cálculo do mesmo, $N_{pl,Rd}$.

A relação de rigidez, μ , é obtida através de duas formas, dependendo do momento atuante:

- Caso $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$:

$$\mu = 1 \quad (2.51)$$

- Se $2/3M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$:

$$\mu = (1,5M_{j,Ed}/M_{j,Rd})^\Psi \quad (2.52)$$

O valor do coeficiente, Ψ , obtém-se através do quadro 2.9, e depende do tipo de ligação.

Quadro 2.9: Estimação de Ψ , [4]

Tipo de ligação	Ψ
Soldada	2,7
Chapa de extremidade aparafusada	2,7
Cantoneiras de ligação dos banzos aparafusadas	3,1
Chapas de base de colunas	2,7

Naturalmente, no cálculo da rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}$, considera-se que μ é igual a 1 pois verifica-se que:

$$M_{j,Ed} = 0 \leq 2/3M_{j,Rd} \quad (2.53)$$

2.9 – Traçado da curva momento-rotação

Segundo o [4], no caso particular de perfis em I ou H, o traçado aproximado da curva momento-rotação é efetuado de acordo com as seguintes condições (ver figura 2.27):

- Se $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$:

A curva momento rotação é representada por uma reta que passa na origem com o declive igual à rigidez inicial de rotação, $S_{j,ini}$. Na prática, o comportamento de uma ligação para momentos atuantes desta ordem de grandeza é muito semelhante ao modelo adotado pois, segundo Zoetemeijer, uma ligação metálica caracteriza-se por um comportamento linear para momentos até cerca de $2/3M_{j,Rd}$, [11].

- Se $2/3M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$

Neste caso considera-se que o declive da reta é igual a $S_{j,ini}/\eta$, em que, η , representa o coeficiente de modificação de rigidez, o qual pode ser obtido no quadro 2.10, consoante o tipo de ligação.

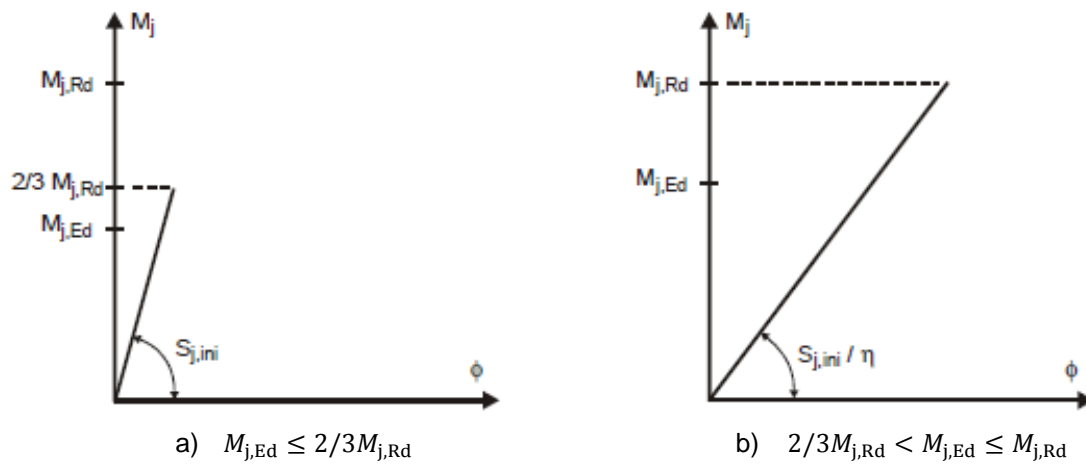


Figura 2.27: Rigidez de rotação a utilizar na análise global elástica, [4]

Para uma efetuar uma aproximação bilinear, considera-se que o comportamento da ligação é linear para momentos atuantes inferiores ao momento resistente, sendo o declive igual à rigidez de rotação, $S_{j,ini}/\eta$. Quando é atingido o momento resistente, a ligação atinge o colapso (ver figura 2.28).

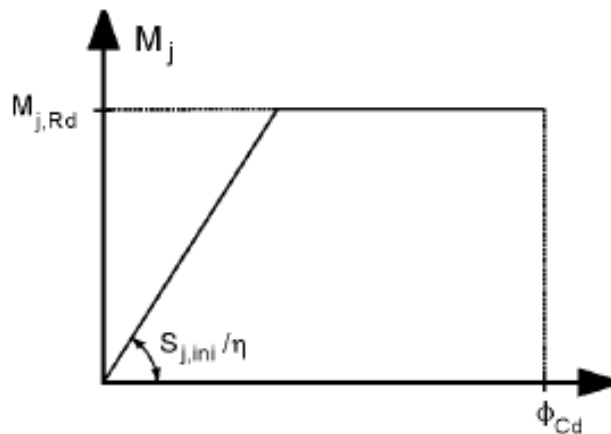


Figura 2.28: Relação momento-rotação de cálculo simplificada, [4]

Contudo, sabendo que a rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}$, caracteriza melhor o comportamento da junta para momentos inferiores a $2/3 M_{j,Rd}$, conclui-se que uma aproximação trilinear é mais precisa. Esta aproximação pode ser feita seguindo os respetivos passos (ver figura 2.29):

1. Atribuição da rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}$, à junta quando $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$;
2. Traçado de uma reta horizontal com a ordenada correspondente ao no momento resistente $M_{j,Rd}$;
3. Traçado da curva momento-rotação considerando o coeficiente de redução, η ;
4. Através da interseção das duas últimas retas descritas, é possível obter o valor da rotação da junta, $\phi_{j,Rd}$, correspondente ao instante em que é atingido o momento resistente, $M_{j,Rd}$. Assim, para $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$, a curva momento-rotação, é dada pela reta que une os pontos de ordenada $2/3 M_{j,Rd}$ e $M_{j,Rd}$.

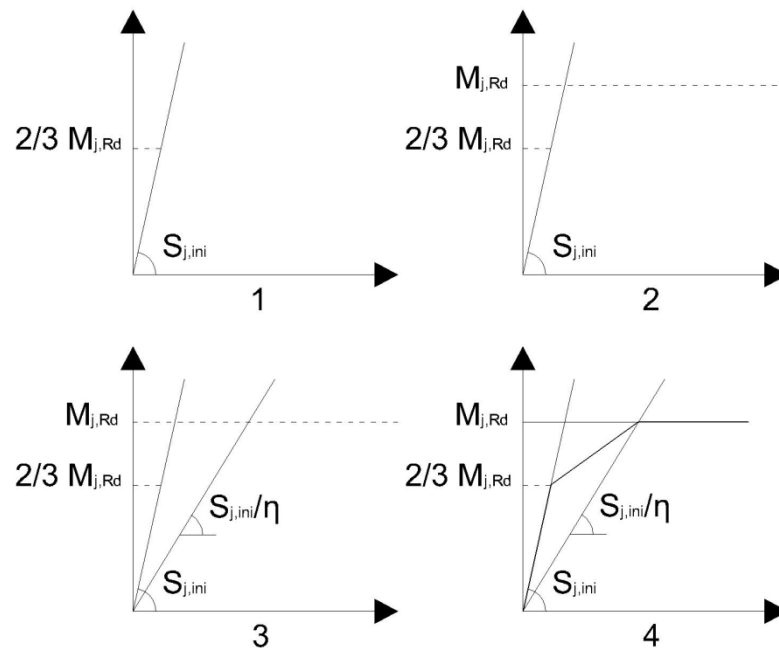


Figura 2.29: Aproximação trilinear de uma curva momento-rotação

Quadro 2.10: Coeficiente de alteração da rigidez η , [4]

Tipo de ligação	Juntas viga-coluna	Outros tipos de junta (viga-viga, de continuidade de vigas, da base de colunas)
Soldada	2	3
Chapas de extremidade aparafusadas	2	3
Cantoneiras de apoio de banzo aparafusadas	2	3,5
Chapas de base	-	3

2.10 – Classificação de uma ligação viga-pilar quanto à sua rigidez

As ligações metálicas podem ser agrupadas em três classes conforme a respetiva rigidez de rotação. Com a exceção de ligações à base de uma coluna, esta avaliação é feita através da verificação das seguintes condições, [4]:

- Ligações articuladas:

$$S_{j,ini} \leq 0,5EI_b/L_b \quad (2.54)$$

As ligações articuladas não transmitem momentos, logo, têm de estar aptas a sofrer rotações sem provocar danos à estrutura.

- Ligações semi-rígidas:

$$0,5EI_b/L_b < S_{j,ini} < k_bEI_b/L_b \quad (2.55)$$

Estas ligações transmitem momentos de elemento para elemento mas, na análise global da estrutura não podem ser consideradas como encastramentos perfeitos. Isto significa que é necessário modelar uma ligação deste tipo como uma mola rotacional na estrutura, cujo comportamento é regido pela respetiva curva momento-rotação da ligação.

- Ligações rígidas:

$$S_{j,ini} \geq k_bEI_b/L_b \quad (2.56)$$

Estas ligações têm uma rigidez de rotação tal que a transmissão de momentos de elemento para elemento pode ser considerada total na análise global da estrutura.

Para pórticos contraventados em que o deslocamento horizontal é reduzido até pelo menos 80% devido ao contraventamento toma-se:

$$k_b = 8 \quad (2.57)$$

Para outros pórticos em que se verifique a condição, K_b/K_c :

$$k_b = 25 \quad (2.58)$$

Onde:

K_b – Média de I_b/L_b para todas as vigas dos andares superiores ao estudado;

K_c – Média de I_c/L_c para todos os pilares do andar estudado;

I_b – Inercia da secção da viga;

L_b – Vão da viga;

I_c – Inercia da secção do pilar;

L_c – Altura do piso.

3 – Programas de cálculo automático

3.1 – Considerações gerais

Os programas de cálculo automático constituem ferramentas de grande utilidade para o projeto de ligações metálicas. Efetivamente, tais programas permitem proceder de modo eficiente à análise e comparação de várias alternativas para uma dada ligação, possibilitando assim a obtenção de uma solução ideal que garanta de forma satisfatória a resistência necessária.

O recurso a programas de cálculo automático é particularmente vantajoso no dimensionamento do reforço de uma ligação, já que o mesmo consiste num processo iterativo que se pode revelar muito moroso. Com efeito, mesmo estando identificados os elementos da ligação cujo reforço é mais benéfico, é geralmente necessário recalcular o valor resistente de todas as componentes para voltar a verificar a segurança. Após estes cálculos, a segurança pode ainda não ser garantida, o que significa que a ligação necessita de reforço adicional. Assim, o projetista pode ver-se obrigado a reforçar a ligação e a calcular a correspondente resistência repetidamente, até conseguir atingir uma solução económica que verifique a segurança.

Em todo o caso, importa salientar que, após se proceder ao cálculo de uma ligação com o auxílio de software, é recomendável efetuar os cálculos das componentes ativas da ligação através do EC3, para confirmar a validade dos resultados da solução adotada.

3.2 – Powerconnect

Powerconnect é um programa de cálculo automático desenvolvido pela empresa Buildsoft. Destinado apenas à análise de ligações metálicas, este programa baseia-se também no método das componentes para determinar o momento resistente de uma junta bem como para classifica-la quanto à sua rigidez. Os resultados podem estar em conformidade com o EC3 ou com a norma indiana (IS800) conforme a preferência do utilizador, [1].

Como já foi referido anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo estudar apenas ligações viga-pilar. Contudo o Powerconnect permite também executar uma análise de juntas pilar-base e viga-viga.

Para as juntas viga-pilar, estão disponíveis todos os tipos de ligações mais importantes (ver figura 3.1). É também possível definir se a ligação é efetuada na alma ou no banzo do pilar e ainda especificar a posição dos parafusos e as dimensões dos perfis e chapas de extremidade, entre outros elementos (ver figuras 3.2 e 3.3).

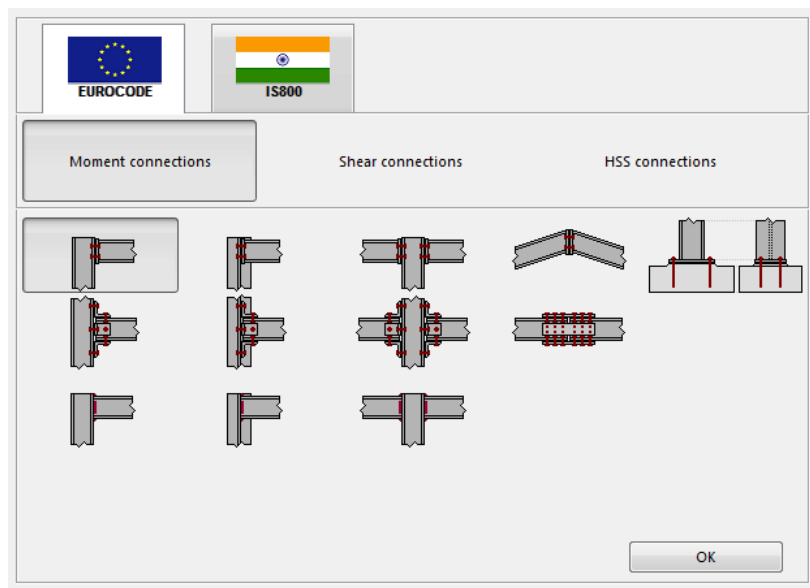


Figura 3.1: Tipos de ligações com transmissão de momentos no Powerconnect

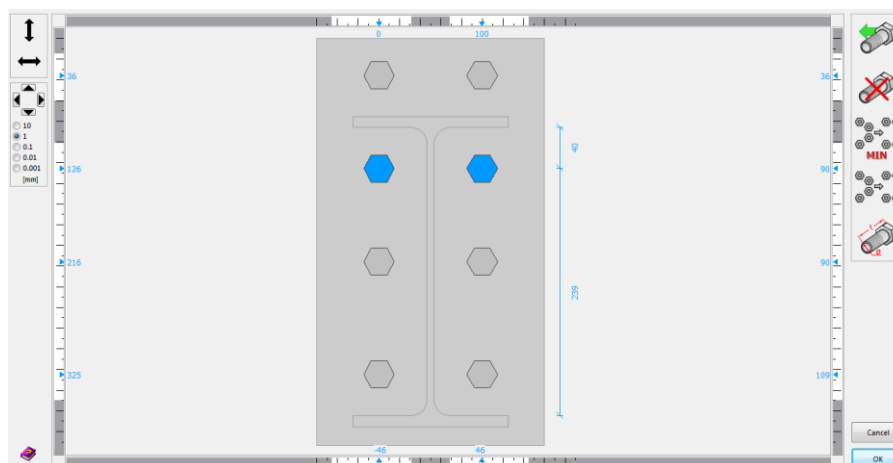


Figura 3.2: Definição da posição dos parafusos no Powerconnect

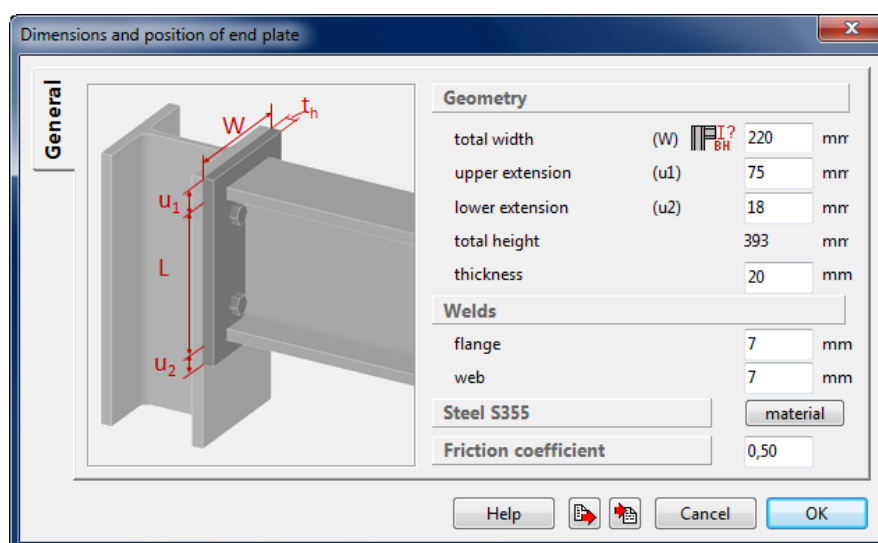


Figura 3.3: Definição da geometria da chapa de extremidade no Powerconnect

Para efeitos de projeto este programa não efetua apenas o cálculo da resistência das ligações. Fornece também dados sobre a resistência e rigidez das componentes ativas e identifica automaticamente qual é a componente menos resistente de cada linha de parafusos, permitindo assim ao projetista saber qual é a componente que necessita de reforço caso não seja verificada a segurança. Esta análise instantânea da ligação e das respetivas componentes permite poupar tempo e esforço ao projetista na procura da solução ideal para o projeto.

O valor da rigidez inicial da curva momento-rotação, pormenorizações instantâneas (ver figura 3.4) e o traçado da curva momento rotação (ver figura 3.5) constituem exemplos de elementos fornecidos automaticamente pelo programa.

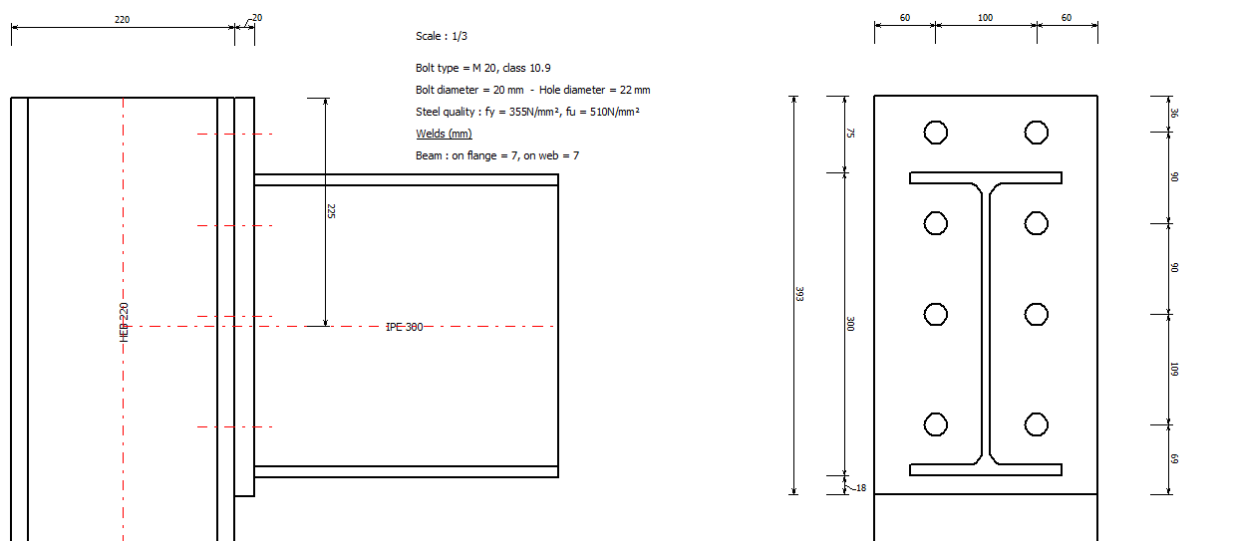


Figura 3.4: Pormenorizações instantâneas no Powerconnect

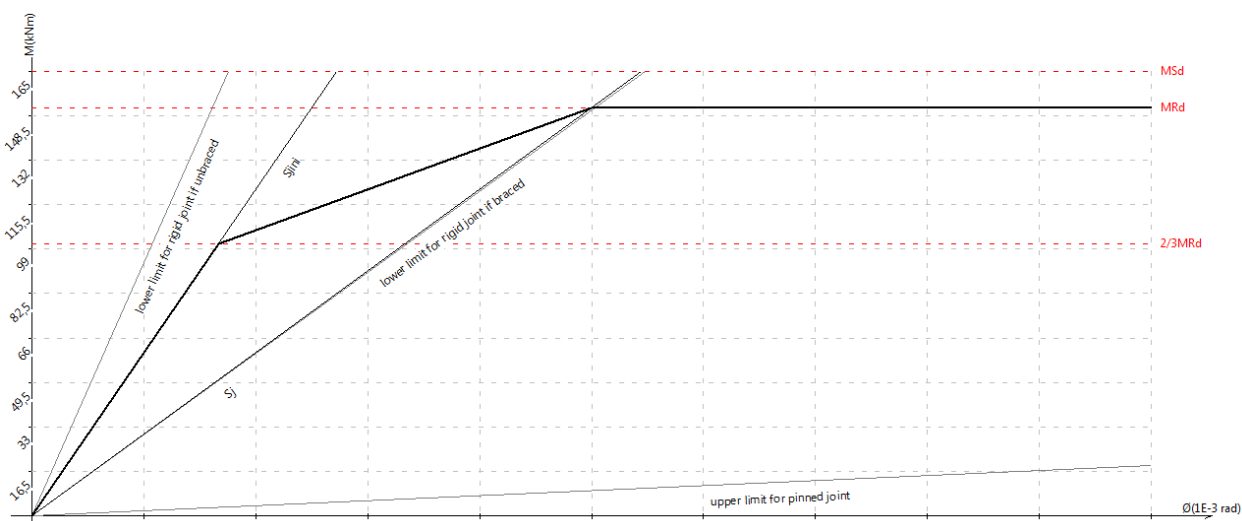


Figura 3.5: Exemplo de uma curva momento-rotação de uma ligação modelada no Powerconnect

3.3 – SAP2000

SAP2000 é um programa altamente divulgado e utilizado no domínio da engenharia civil, nomeadamente para análise e dimensionamento de estruturas. Este programa consiste na aplicação computacional do método dos elementos finitos sobre um modelo estrutural em 2D ou em 3D. O modelo, a malha e as solicitações à estrutura são definidos pelo utilizador de modo a que a caracterização da estrutura e os resultados obtidos (esforços e deformações) sejam o mais precisos possíveis, [5].

4 – Casos de estudo

Neste capítulo é aplicado o método das componentes a dois casos de estudo através da formulação descrita no capítulo 2, sendo depois comparados os resultados com os obtidos através do Powerconnect. Os símbolos e siglas que não se encontram definidos neste capítulo são idênticos aos referenciados capítulo 2.

4.1– Ligação aparafusada com chapa de extremidade não reforçada

4.1.1 – Descrição dos elementos da ligação

Para averiguar a qualidade dos resultados obtidos no programa de cálculo Powerconnect, tomou-se como exemplo o seguinte caso de estudo:

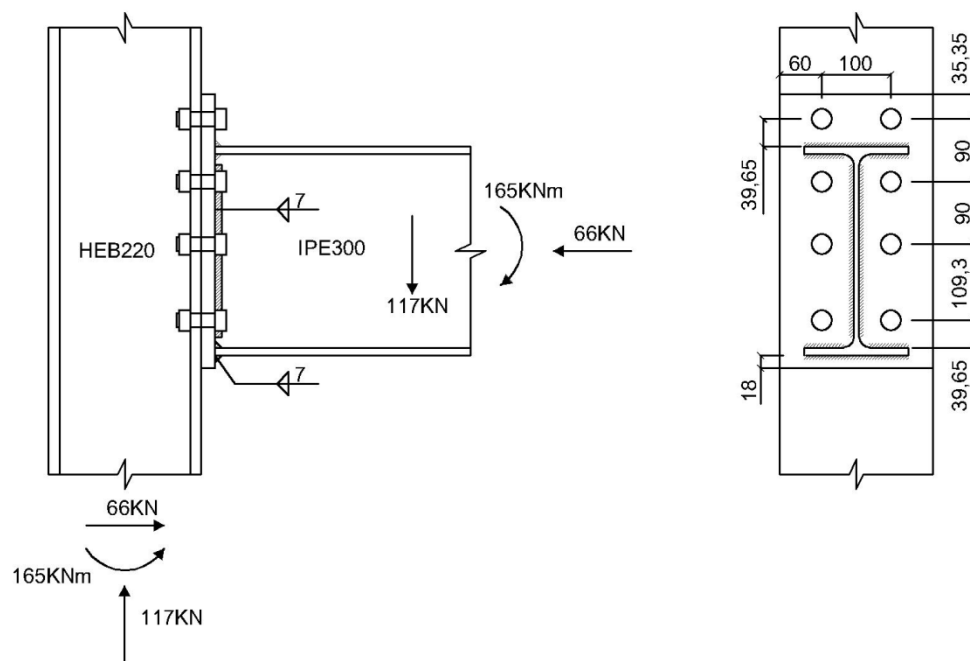


Figura 4.1: Geometria da ligação não reforçada

O pilar tem 2,5m de comprimento desde a ligação estudada até ao solo e estende-se até 2,5m para cima da ligação considerada. A viga tem 10m de comprimento e ambos os perfis são de classe S355 com as características indicadas no quadro 4.1.

A chapa de extremidade tem dimensões $393 \times 220 \times 20$ mm e a sua classe é S355. Os parafusos são de classe 10.9 e têm diâmetro M20, encontrando-se as suas propriedades no quadro 4.2.

Quadro 4.1: Propriedades mecânicas e geométricas dos perfis considerados

Perfil	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r Mm	A cm ²	d _c mm	I cm ⁴	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	f _y MPa	f _u MPa	Classe	
													Flexão simples	Compressão pura
HEB 220	220	220	9,5	16,0	18	91,04	152	8091,0	735,5	827,0	355	490	1	1
IPE300	300	150	7,1	10,7	15	53,81	248,6	8356	557,1	628,4	355	490	1	4

Onde:

h – Altura do perfil;
 b – Largura do perfil;
 t_w – Espessura da alma do perfil;
 t_f – Espessura do banzo do perfil;
 r – Raio de concordância do perfil;
 A – Área da secção transversal do perfil;
 I – Momento de Inercia do perfil;
 W_{el} – Módulo elástico do perfil;
 W_{pl} – Módulo plástico do perfil;
 f_y – Tensão de cedência do perfil;
 f_u – Tensão última do perfil.

Visto que as forças de compressão atuantes em ambos os perfis são muito reduzidas, admitiu-se que para o efeito de classificação dos perfis encontram-se ambos em flexão simples. Assim considera-se que tanto a viga como o pilar são de classe 1, ou seja, admite-se uma distribuição de tensões em regime plástico.

Quadro 4.2: Propriedades mecânicas e geométricas dos parafusos considerados, [4] e [2]

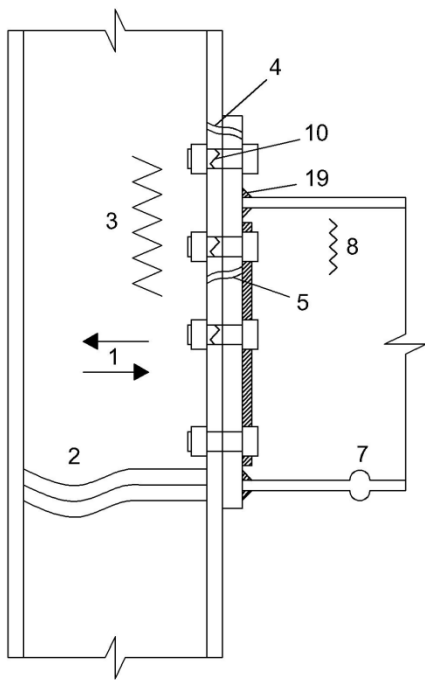
Parafusos	f_{yb}	f_{ub}	d	d_0	A	A_s	d_m	e_p	k	s_1
	MPa	MPa	mm	Mm	mm ²	mm ²	Mm	Mm	mm	Mm
	900	1000	20	22	314	245	30	16	13	4

Em que:

d – Diâmetro do parafuso;
 d_0 – Diâmetro do furo;
 A – Área bruta da secção transversal do parafuso;
 A_s – Área da zona roscada do parafuso;
 d_m – Largura da porca e cabeça do parafuso;
 e_p – Espessura da porca;
 k – Espessura da cabeça do parafuso;
 s_1 – Espessura da anilha;
 f_{yb} – Tensão de cedência dos parafusos;
 f_{ub} – Tensão de colapso dos parafusos;

4.1.2 – Identificação das componentes

Tendo o momento atuante na ligação sentido negativo, é natural que as componentes localizadas junto ao banzo inferior da viga se encontrem em compressão e as restantes à tração. Assim, são identificadas as seguintes componentes que influenciam o valor do momento resistente da ligação.



Componentes	
1	Alma do pilar ao esforço transversal
2	Alma do pilar em compressão transversal
3	Alma do pilar em tração transversal
4	Banzo do pilar em flexão transversal
5	Chapa de extremidade à flexão
7	Banzo e alma da viga em compressão
8	Alma da viga em tração
10	Parafusos à tração
19	Soldaduras à tração

Figura 4.2: Identificação das componentes ativas (primeiro caso de estudo)

Quadro 4.3: Identificação das componentes ativas em cada linha de compressão ou tração

Linha	Componentes ativas
1	3, 4, 5, 10 e 19
2	3, 4, 5, 8, 10 e 19
3	3, 4, 5, 8, 10 e 19
4	3, 4, 5, 8, 10 e 19
Compressão	1, 2 e 7

4.1.3 – Considerações iniciais de dimensionamento

Para calcular o momento resistente da ligação e a sua rigidez rotacional, consideraram-se os seguintes pressupostos:

- O centro de compressão encontra-se a meio da espessura do banzo inferior da viga;
- O centro de tração é considerado inicialmente como localizado a meio da espessura do banzo superior da viga. Após o cálculo da rigidez de todas as componentes, é estimada a sua localização mais exata através da metodologia indicada no ponto 2.8;
- À partida existem apenas duas ou três linhas de parafusos tracionadas. Contudo os valores resistentes das componentes da 4ª linha de parafusos também serão determinados, não com o propósito de cálculo da resistência da ligação à flexão, mas para comparação com os resultados do Powerconnect.

4.1.4 – Cálculo do valor resistente das componentes

4.1.4.1 – Componentes na linha de compressão

4.1.4.1.1 – Componente 1 – Alma do pilar sujeita ao esforço transversal

Verificação da condição de limite da esbelteza da alma do pilar:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} \approx 0,81 \quad (4.1)$$

$$d_c/t_{wc} = \frac{152}{7,1} = 21,41 \leq 69 \times \varepsilon = 55,89 \quad (4.2)$$

Estando verificada esta condição, considera-se aplicável o método de cálculo exposto no capítulo 2.4.1.

Cálculo da área resistente ao corte da coluna:

$$A_{vc} = A_c - 2b_c t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c)t_{fc} \quad (4.3)$$

$$A_{vc} = 91,04 - 2 \times 22,0 \times 1,60 + (0,950 + 2 \times 1,80) \times 1,60 = 27,92 \times cm^2 \quad (4.4)$$

Resistência da alma do pilar ao esforço transversal:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} = \frac{0,9 \times 355 \times 27,92 \times 10^{-1}}{\sqrt{3} \times 1} = 515,02KN \quad (4.5)$$

4.1.4.1.2 – Componente 2 – Alma do pilar sujeita a compressão transversal

Tendo em conta de que no presente caso de estudo a ligação é aparafusada com chapa de extremidade, o comprimento efetivo da alma do pilar em compressão transversal é calculado através da seguinte expressão:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (4.6)$$

Em primeiro lugar é necessário verificar qual o valor de s_p a ser utilizado. Este valor depende da relação entre a espessura da chapa de extremidade, t_p , e a extensão desta para além do banzo inferior da viga que é igual a 18mm.

Como $t_p = 20mm \geq 18mm$, adota-se o valor mínimo de s_p ou seja, $s_p = t_p = 20mm$.

Logo:

$$b_{eff,c,wc} = 10,7 + 2\sqrt{2} \times 7 + 5 \times (16 + 18) + 20 = 220,50mm \quad (4.7)$$

Cálculo do coeficiente de redução, ω :

Observando os quadros 2.2 e 2.3 conclui-se que:

$$\beta = 1 \quad (4.8)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc}t_{wc}/A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(220,50 \times 9,5/2792)^2}} = 0,760 \quad (4.9)$$

Cálculo do coeficiente de redução, ρ :

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{\text{eff},c,wc} d_c f_{y,wc}}{Et_{wc}^2}} = 0,932 \sqrt{\frac{220,5 \times 152 \times 355 \times 10^{-3}}{210 \times 9,5^2}} = 0,738 > 0,72 \quad (4.10)$$

Logo:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,738 - 0,2}{0,738^2} = 0,988 \quad (4.11)$$

Cálculo do coeficiente de redução, k_{wc} :

Em primeiro lugar é necessário calcular a tensão máxima de compressão na alma do pilar, $\sigma_{\text{com,Ed}}$, quando este é sujeito a um momento fletor de 165KNm e a uma força de compressão de 117KN (considerando desprezável o peso próprio do pilar situado acima da ligação).

Admitindo que as tensões se distribuem em regime elástico (figura 4.3), o valor de $\sigma_{\text{com,Ed}}$ é determinado da seguinte forma:

$$\sigma_{\text{com,Ed}} = M_{\text{Ed}}/w_{\text{el}} + N_{\text{Ed}}/A = \frac{165}{735,5 \times 10^{-3}} + \frac{117}{53,81 \times 10^{-1}} \quad (4.12)$$

$$\sigma_{\text{com,Ed}} = 246,08 \leq 0,7f_{y,c} = 0,7 \times 355 = 248,5 \text{ MPa} \quad (4.13)$$

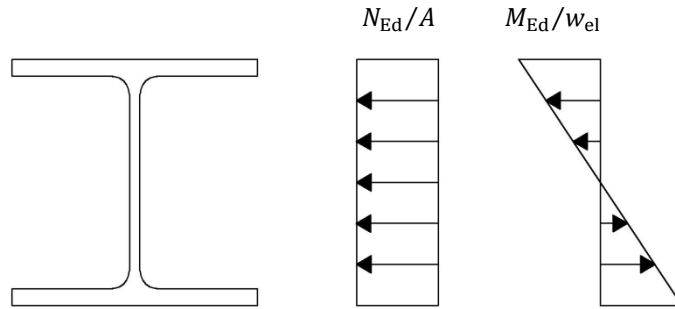


Figura 4.3: Distribuição de tensões no pilar em regime elástico

Logo:

$$k_{wc} = 1 \quad (4.14)$$

Cálculo da resistência da alma do pilar à compressão transversal:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{\text{eff},c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{\text{eff},c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (4.15)$$

Como $\gamma_{M1} = \gamma_{M0} = 1$ e $\rho = 0,988$:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} \rho b_{\text{eff},c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,760 \times 1 \times 0,988 \times 220,50 \times 9,5 \times 355 \times 10^{-3}}{1} \quad (4.16)$$

$$F_{c,wc,Rd} = 558,38 \text{ KN} \quad (4.17)$$

4.1.4.1.3 – Componente 7 – Banzo e alma da viga em compressão

Verificação da necessidade de redução do momento resistente da viga devido ao esforço transverso:

$$A_{vb} = A_b - 2b_b t_{fb} + (t_{wb} + 2r_b)t_{fc} = 53,81 - 2 \times 15 \times 1,07 + (0,71 + 2 \times 1,5) \times 1,07 \quad (4.18)$$

$$A_{vb} = 25,68 \text{ cm}^2 \quad (4.19)$$

$$V_{b,Rd} = \frac{A_{vb}(f_y \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{25,68 \times 355 \times \sqrt{3} \times 10^{-1}}{1} = 1579,007 \text{ KN} \quad (4.20)$$

$$\frac{V_{b,Rd}}{2} = \frac{1579,007}{2} = 789,503 \text{ KN} \geq V_{Ed} = 100 \text{ KN} \quad (4.21)$$

Logo não é necessário reduzir o momento resistente da viga.

Cálculo da resistência do banzo e alma da viga à compressão:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628,4 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 223,08 \text{ KNm} \quad (4.22)$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{b,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{223,08}{(300 - 10,7) \times 10^{-3}} = 771,11 \text{ KN} \quad (4.23)$$

4.1.4.2 – 1ª linha de parafusos tracionados

Como se trata de uma linha de extremidade, a sua resistência é considerada como a resistência da linha de parafusos atuando isoladamente.

4.1.4.2.1 – Componente 4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

Definição dos parâmetros geométricos (ver figuras 4.1 e 2.18):

$$m = \frac{b_p - t_{fc}}{2} - 0,8r_c = \frac{100 - 9,5}{2} - 0,8 \times 18 = 30,85 \text{ mm} \quad (4.24)$$

$$e_{\min} = e = 60 \text{ mm} \quad (4.25)$$

$$e_1 = 2500 - 39,65 = 2460,35 \text{ mm} \quad (4.26)$$

$$n \leq e_{\min}(60 \text{ mm}) \text{ mas } n \leq 1,25m = 1,25 \times 30,85 = 38,56 \text{ mm} \quad (4.27)$$

Assim:

$$n = 38,56 \text{ mm} \quad (4.28)$$

Visto que a 1ª linha de parafusos à tração é uma linha de extremidade adotam-se as seguintes expressões do quadro 2.4 para o comprimento efetivo dos modos de rotura 1 e 2 do banzo do pilar:

Quadro 4. 4: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
	$2\pi m = 2\pi \times 30,85 = 193,84\text{mm}$ $\pi m + 2e_1 = \pi \times 30,85 + 2 \times 2460,35 = 5017,62\text{mm}$	$4m + 1,25e = 4 \times 30,85 + 1,25 \times 60 = 198,4\text{mm}$ $2m + 0,625e + e_1 = 2 \times 30,85 + 0,625 \times 60 + 2460,35 = 2559,55\text{mm}$
Modo 1	$l_{\text{eff,1}} = l_{\text{eff,nc}} = 198,4\text{mm}$ mas $l_{\text{eff,1}} \leq l_{\text{eff,cp}} = 193,84\text{mm}$	
Modo 2	$l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}} = 198,4\text{mm}$	

Assim:

$$l_{\text{eff,1}} = 193,84\text{mm} \text{ e } l_{\text{eff,2}} = 198,4\text{mm} \quad (4.29)$$

Nota: Esta linha de parafusos só deverá ser analisada como parte de um grupo de parafusos quando forem analisados os eixos de tração inferiores.

Resistência individual de cada parafuso à tração:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 1000 \times 245 \times 10^{-3}}{1,25} = 176,4\text{KN} \quad (4.30)$$

Resistência do banzo do pilar ao punçoamento:

$$B_{p,Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} = \frac{0,6\pi \times 30 \times 16 \times 490 \times 10^{-3}}{1,25} = 354,673\text{KN} \geq F_{t,Rd} = 176,4\text{KN} \quad (4.31)$$

Verificação da existência de forças de alavanca:

$$l_b = \frac{k + e_p}{2} + t_p + t_{fc} + s_1 = \frac{13 + 16}{2} + 20 + 16 + 4 = 54,5\text{mm} \quad (4.32)$$

$$l_b^* = \frac{(8,8m^3 A_s n_b)}{\sum l_{\text{eff},1} t_f^3} = \frac{(8,8 \times 30,85^3 \times 245 \times 1)}{193,84 \times 16^3} = 79,73\text{mm} \quad (4.33)$$

Como $l_b \leq l_b^*$, verifica-se a existência de forças de alavanca.

Cálculo da resistência do banzo do pilar à flexão transversal (ver quadro 2.1):

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{\text{eff},1} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 193,84 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 4,40\text{KNm} \quad (4.34)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{\text{eff},2} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 198,40 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 4,51\text{KNm} \quad (4.35)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times 4,40}{30,85 \times 10^{-3}} = 571,03KN \quad (4.36)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 4,51 + 38,56 \times 2 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(30,85 + 38,56) \times 10^{-3}} = 325,88KN \quad (4.37)$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 \times 176,4KN = 352,80KN \quad (4.38)$$

Verifica-se que o modo de rotura condicionante para o banzo do pilar à flexão na 1ª linha de parafusos é o segundo. Logo a resistência do banzo à flexão transversal é:

$$F_{T,fc} = 325,88KN \quad (4.39)$$

4.1.4.2.2 – Componente 3 – Alma do pilar sob tração transversal

Como se trata de uma ligação com chapa de extremidade, a largura efetiva da alma do pilar à tração é igual ao comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão. Para estar do lado da segurança, considera-se o comprimento efetivo mais reduzido. Como o comprimento efetivo do 1º modo de rotura é sempre menor ou igual ao do 2º modo, considera-se sempre o valor correspondente ao 1º modo.

$$b_{eff,t,wc} = l_{eff,1} = 193,84mm \quad (4.40)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,t,wc}t_{wc}/A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(193,84 \times 9,5/2792)^2}} = 0,80 \quad (4.41)$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,80 \times 193,84 \times 9,5 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 522,48KN \quad (4.42)$$

4.1.4.2.3 – Componente 5 – Chapa de extremidade à flexão

Definição dos parâmetros geométricos, de acordo com as figuras 2.20, 2.12 e 4.1:

$$m_x = 39,65 - 0,8 \times \sqrt{2} \times 7 = 31,73mm \quad (4.43)$$

$$e_x = 35,35mm \quad (4.44)$$

$$e = 60mm \quad (4.45)$$

$$w = 100mm \quad (4.46)$$

$$b_p = 220mm \quad (4.47)$$

$$m = \frac{100 - 7,1}{2} - 0,8 \times \sqrt{2} \times 7 = 38,53mm \quad (4.48)$$

A 1ª linha de parafusos classifica-se como “Linha de parafusos na parte saliente do banzo tracionado da viga” referenciado no quadro 2.6. Assim, o comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 1ª linha de parafusos é obtido pelo quadro 4.5:

Quadro 4.5: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)

	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
O menor dos seguintes valores	$2\pi m_x = 2\pi \times 31,73 = 218,22\text{mm}$ $\pi m_x + w = \pi \times 31,73 + 100 = 209,11\text{mm}$ $\pi m_x + 2e = \pi \times 31,73 + 2 \times 60 = 219,68\text{mm}$	$4m_x + 1,25e_x = 4 \times 31,73 + 1,25 \times 35,35 = 171,11\text{mm}$ $e + 2m_x + 0,625e_x = 60 + 2 \times 31,73 + 0,625 \times 35,35 = 145,55\text{mm}$ $0,5b_p = 0,5 \times 220 = 110\text{mm}$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x = 0,5 \times 100 + 2 \times 31,73 + 0,625 \times 35,35 = 135,55\text{mm}$
Modo 1:	$l_{\text{eff,1}} = l_{\text{eff,nc}} = 110\text{mm}$ mas $l_{\text{eff,1}} \leq l_{\text{eff,cp}} = 209,11\text{mm}$	
Modo 2:	$l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}} = 110\text{mm}$	

Verificação da existência de forças de alavanca:

$$l_b^* = \frac{(8,8m^3 A_s n_b)}{\sum l_{\text{eff,1}} t_f^3} = \frac{(8,8 \times 31,73^3 \times 245 \times 1)}{110 \times 20^3} = 78,27\text{mm} \geq l_b = 54,5\text{mm} \quad (4.49)$$

Logo confirma-se a existência de forças de alavanca.

Cálculo da resistência da chapa de extremidade à flexão transversal, (ver quadro 2.1):

$$M_{\text{pl,1,Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff,1}} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 110 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 3,91\text{KNm} \quad (4.50)$$

$$M_{\text{pl,2,Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff,2}} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 110 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 3,91\text{KNm} \quad (4.51)$$

Nota: Na linha de parafusos da saliência da chapa de extremidade, considera-se que o valor de m do T-stub equivalente é igual a m_x .

$$n \leq e_{\text{min}}(60\text{mm}) \text{ mas } n < 1,25m_x = 1,25 \times 31,73 = 39,66\text{mm} \quad (4.52)$$

Logo, $n = 39,66\text{mm}$

$$F_{\text{T,1,Rd}} = \frac{4M_{\text{pl,1,Rd}}}{m_x} = \frac{4 \times 3,91}{31,73 \times 10^{-3}} = 492,28\text{KN} \quad (4.53)$$

$$F_{\text{T,2,Rd}} = \frac{2M_{\text{pl,2,Rd}} + n \sum F_{\text{t,Rd}}}{m_x + n} = \frac{2 \times 4,51 + 38,56 \times 2 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(31,73 + 39,66) \times 10^{-3}} = 305,39\text{KN} \quad (4.54)$$

O terceiro modo de rotura da chapa de extremidade e do banzo do pilar à flexão corresponde à rotura dos parafusos. Logo, este modo é igual para as duas componentes e para todas as linhas de tração quando consideradas como isoladas. Assim este modo só será calculado novamente quando forem analisadas as linhas de parafusos atuando em grupos.

4.1.4.1.5 – Resistência da 1ª linha de tração

Tendo em conta todas as componentes da 1ª linha de tração analisadas conclui-se que a resistência desta linha é dada por:

$$P_{r1} = \text{mínimo}\{325,88; 522,48; 305,39\} = 305,39KN \quad (4.55)$$

Neste caso, a componente determinante é a chapa de testa à flexão transversal.

4.1.4.3 – 2ª linha de parafusos tracionados

No caso das componentes 3 e 4, esta linha tem que ser analisada como um eixo de parafusos isolado, ou como parte de um grupo de parafusos. No caso das componentes 5 e 7 considera-se apenas a linha isolada, pois o banzo da viga funciona como um divisor de grupos de linhas de tração.

4.1.4.3.1 – Componente 4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

a) 2ª linha de parafusos isolada

Os parâmetros geométricos são iguais aos da 1ª linha.

Cálculo do comprimento efetivo:

Tratando-se de uma linha interior, o comprimento efetivo é dado pelo quadro 4.6:

Quadro 4. 6: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
	$2\pi m = 2\pi \times 30,85 = 193,84mm$	$4m + 1,25e = 4 \times 30,85 + 1,25 \times 60 = 198,4mm$
Modo 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc} = 198,4mm$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp} = 193,84mm$	
Modo 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 198,4mm$	

Verificação da existência de forças de alavanca:

É igual à verificação da possibilidade de ocorrência de forças de alavanca no banzo à flexão para a 1ª linha de tração.

Como os comprimentos efetivos são iguais aos da 1ª linha de parafusos, os valores da resistência do banzo do pilar à tração para os diferentes modo de rotura também são iguais:

$$F_{T,1,Rd} = 571,03KN \quad (4.56)$$

$$F_{T,2,Rd} = 325,88KN \quad (4.57)$$

$$F_{T,3,Rd} = 352,80KN \quad (4.58)$$

Assim, o modo de rotura condicionante é novamente o segundo.

b) 2ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2

$$p = 90mm \quad (4.59)$$

Cálculo do comprimento efetivo da 1ª linha de parafusos como parte de um grupo (ver quadro 4.7):

Quadro 4.7: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2 (ligação não reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
	$\pi m + p = \pi \times 30,85 + 90 = 186,92mm$ $2e_1 + p = 2 \times 2460,35 + 90 = 5010,7mm$	$2m + 0,625e + 0,5p$ $= 2 \times 30,85 + 0,625 \times 60 + 0,5 \times 90 = 144,2mm$ $e_1 + 0,5p = 2460,35 + 0,5 \times 90 = 2505,35mm$

$$l_{eff,cp} = 186,92mm \text{ e } l_{eff,nc} = 144,2mm \quad (4.60)$$

Cálculo do comprimento efetivo da 2ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2:

Apesar de esta ser uma linha de parafusos interior quando se analisa a junta de uma forma global, considerando o grupo de linhas de tração 1+2, a linha passa a ser vista como a linha de extremidade inferior. Por isso, neste caso o seu comprimento efetivo é dado pelas expressões indicadas no quadro 4.8.

Quadro 4.8: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2 (ligação não reforçada)

Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
$\pi m + p = \pi \times 30,85 + 90 = 186,92mm$	$2m + 0,625e + 0,5p$ $= 2 \times 30,85 + 0,625 \times 60 + 0,5 \times 90 = 144,2mm$

Cálculo do comprimento efetivo do grupo de parafusos 1+2:

$$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc} = 144,2 + 144,2 = 288,40mm \quad (4.61)$$

Mas:

$$\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp} = 186,92 + 186,92 = 373,84mm \quad (4.62)$$

$$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff},\text{nc}} = 288,40\text{mm} \quad (4.63)$$

Nota: No caso de grupos de linhas de parafusos, o somatório do comprimento efetivo do T-stub com troços circulares, $\sum l_{\text{eff},\text{cp}}$, é geralmente superior ao mesmo sem troços circulares, $\sum l_{\text{eff},\text{nc}}$. Assim sendo, o primeiro não é considerado nos restantes cálculos do trabalho.

Verificação da existência de forças de alavanca:

É necessário ter em conta que no grupo de parafusos considerado existem duas linhas de tração.

$$l_b^* = \frac{(8,8m^3 A_s n_b)}{\sum l_{\text{eff},1} t_f^3} = \frac{(8,8 \times 30,85^3 \times 245 \times 2)}{288,40 \times 16^3} = 107,17\text{mm} \geq l_b = 54,5\text{mm} \quad (4.64)$$

Assim, verifica-se mais uma vez a existência de forças de alavanca.

Nota: Os valores de l_b^* para as restantes componentes e linhas de tração nos dois casos de estudo (ligação reforçada e não reforçada) encontram-se nos quadros A.1, A.2, A.6 e A.7, onde se verifica que devem ser consideradas forças de alavanca para todas as componentes do T-stub equivalente.

Cálculo da resistência do banzo do pilar à flexão para o grupo de linhas de parafusos (1+2):

Como cada linha de tração é composta por dois parafusos, é necessário ter em conta que existem no total quatro parafusos para os modos de rotura 2 e 3.

$$M_{\text{pl},1,\text{Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff},1} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 288,40 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 6,55\text{KNm} \quad (4.65)$$

$$M_{\text{pl},2,\text{Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff},2} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 288,40 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 6,55\text{KNm} \quad (4.66)$$

$$F_{\text{T},1,\text{Rd}} = \frac{4M_{\text{pl},1,\text{Rd}}}{m} = \frac{4 \times 6,55}{30,85 \times 10^{-3}} = 849,59\text{KN} \quad (4.67)$$

$$F_{\text{T},2,\text{Rd}} = \frac{2M_{\text{pl},2,\text{Rd}} + n \sum F_{\text{t},\text{Rd}}}{m + n} = \frac{2 \times 6,55 + 38,56 \times 4 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(30,85 + 38,56) \times 10^{-3}} = 580,79\text{KN} \quad (4.68)$$

$$F_{\text{T},3,\text{Rd}} = \sum F_{\text{t},\text{Rd}} = 4 \times 176,4\text{KN} = 705,60\text{KN} \quad (4.69)$$

Verifica-se pois que o modo de rotura condicionante é o segundo.

Estes valores correspondem à resistência do grupo de parafusos 1+2. Contudo para obter a resistência do banzo do pilar à flexão na 2ª linha de tração como parte deste grupo é ainda necessário subtrair a resistência da 1ª linha a estes valores.

$$F_{T,1,Rd} = 849,59 - P_{r1} = 849,59 - 305,39KN = 544,19KN \quad (4.70)$$

$$F_{T,2,Rd} = 580,79KN - 305,39 = 275,40KN \quad (4.71)$$

$$F_{T,3,Rd} = 705,60KN - 305,39 = 400,21KN \quad (4.72)$$

4.1.4.3.2 – Componente 3 – Alma do pilar sob tração transversal

a) 2ª linha de parafusos isolada

Neste caso em particular, os parâmetros de cálculo são todos iguais aos da 1ª linha de tração. Logo, a resistência desta componente tem o mesmo valor obtido para a 1ª linha:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,80 \times 288,40 \times 9,5 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 522,48KN \quad (4.73)$$

b) 2ª linha de parafusos como parte do grupo 1+2

$$b_{eff,t,wc} = \sum l_{eff,1} = 288,40mm \quad (4.74)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,t,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(288,40 \times 9,5 / 2792)^2}} = 0,67 \quad (4.75)$$

Resistência da alma do pilar à tração para o grupo de parafusos (1+2):

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,67 \times 288,40 \times 9,5 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 648,15KN \quad (4.76)$$

Resistência da alma do pilar à tração para a 2ª linha de tração como parte do grupo de parafusos (1+2):

$$F_{t,wc,Rd} = 648,15 - P_{r1} = 648,15 - 305,39 = 342,76KN \quad (4.77)$$

4.1.4.3.3 – Componente 5 – Chapa de extremidade à flexão

A 2ª linha de parafusos é adjacente ao banzo tracionado da viga. Logo, para determinar o comprimento efetivo, é necessário determinar o coeficiente α retirado do ábaco da figura 2.19.

Das figuras 2.19 e 4.1 conclui-se que:

$$m_2 = 39,65 - 0,8 \times \sqrt{2} \times 7 = 31,73mm \quad (4.78)$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} = \frac{38,53}{38,53 + 60} = 0,39 \quad (4.79)$$

$$\lambda_2 = \frac{31,73}{38,53 + 60} = 0,32 \quad (4.80)$$

$$\alpha \approx 7 \quad (4.81)$$

Assim obtêm-se os valores de comprimentos efetivos indicados no quadro 4.9.

Quadro 4. 9: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
	$2\pi m = 2\pi \times 38,53 = 242,04\text{mm}$	$\alpha m = 7 \times 38,53 = 269,71\text{mm}$
Modo 1:	$l_{\text{eff,1}} = l_{\text{eff,nc}} = 269,71\text{mm}$ mas $l_{\text{eff,1}} \leq l_{\text{eff,cp}} = 242,04\text{mm}$	
Modo 2:	$l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}} = 269,71\text{mm}$	

Cálculo da resistência da chapa de extremidade à flexão transversal:

$$M_{\text{pl,1,Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff,1}} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 242,04 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 8,59\text{KNm} \quad (4.82)$$

$$M_{\text{pl,2,Rd}} = 0,25 \sum l_{\text{eff,2}} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 269,71 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 9,57\text{KNm} \quad (4.83)$$

$$n \leq e_{\text{min}}(60\text{mm}) \text{ mas } n < 1,25m = 1,25 \times 38,53 = 48,16\text{mm} \quad (4.84)$$

$$F_{\text{T,1,Rd}} = \frac{4M_{\text{pl,1,Rd}}}{m} = \frac{4 \times 8,59}{38,53 \times 10^{-3}} = 892,02\text{KN} \quad (4.85)$$

$$F_{\text{T,2,Rd}} = \frac{2M_{\text{pl,2,Rd}} + n \sum F_{\text{t,Rd}}}{m + n} = \frac{2 \times 4,51 + 38,56 \times 2 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(38,53 + 48,16) \times 10^{-3}} = 416,89\text{KN} \quad (4.86)$$

$$F_{\text{T,3,Rd}} = 352,80\text{KN} \quad (4.87)$$

Conclui-se que neste caso o modo de rotura condicionante é o 3º.

4.1.4.3.4 – Componente 8 – Alma da viga em tração

De forma análoga à alma do pilar em tração transversal, a largura efetiva desta componente é igual ao comprimento efetivo do 1º modo de rotura da placa de extremidade à flexão.

$$b_{\text{eff,t,wb}} = l_{\text{eff,1}} = 242,04\text{mm} \quad (4.88)$$

Assim a resistência desta componente é dada por:

$$F_{\text{t,wb,Rd}} = \frac{b_{\text{eff,t,wb}} t_{\text{wb}} f_{y,\text{wb}}}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{242,04 \times 7,1 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 610,06\text{KN} \quad (4.89)$$

4.1.4.3.5 – Resistência da 2ª linha de tração

$$P_{r2} = \text{mínimo}\{325,88; 275,40; 522,48; 342,76; 352,80; 610,06\} = 275,40KN \quad (4.90)$$

A resistência da 2ª linha de parafusos é dado pela resistência do banzo do pilar à flexão como parte do grupo (1+2).

4.1.4.4 – 3ª linha de parafusos tracionados

4.1.4.4.1 – Componente 4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

a) 3ª linha de parafusos isolada

Como esta linha tem características geométricas iguais à 2ª e é também uma linha interior, os valores de cálculo são iguais aos da 2ª linha. Assim:

$$F_{T,1,Rd} = 571,03KN \quad (4.91)$$

$$F_{T,2,Rd} = 325,88KN \quad (4.92)$$

$$F_{T,3,Rd} = 352,80KN \quad (4.93)$$

b) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3)

$$p = 90mm \quad (4.94)$$

Tratando-se de um grupo com duas linhas de tração, consideram-se as duas linhas como linhas de extremidade do grupo. Assim, os resultados são iguais aos do grupo de parafusos (1+2).

$$F_{T,1,Rd} = 849,59KN \quad (4.95)$$

$$F_{T,2,Rd} = 580,79KN \quad (4.96)$$

$$F_{T,3,Rd} = 705,60KN \quad (4.97)$$

Contudo, o valor resistente do banzo à flexão para a 3ª linha como parte do grupo de parafusos (2+3) é diferente:

$$F_{T,1,Rd} = 849,59 - P_{r2} = 849,59 - 275,40KN = 574,19KN \quad (4.98)$$

$$F_{T,2,Rd} = 580,79KN - 275,40 = 305,39KN \quad (4.99)$$

$$F_{T,3,Rd} = 705,60KN - 275,40 = 430,20KN \quad (4.100)$$

Verifica-se que o 2º modo de rotura é mais uma vez o modo condicionante.

c) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3)

$$p_{1-2} = 90mm \quad (4.101)$$

$$p_{2-3} = 90mm \quad (4.102)$$

Como as linhas 1 e 3 são de extremidade, os comprimentos efetivos são determinados através da mesma formulação utilizada para o grupo (1+2). Como as propriedades geométricas são as mesmas, o resultado é igual. Ou seja:

$$l_{eff,nc} = 144,2mm \quad (4.103)$$

Já a 2ª linha neste caso é uma linha interior do grupo, por isso o comprimento efetivo correspondente é dado por:

$$l_{eff,nc} = p = 90mm \quad (4.104)$$

Cálculo do comprimento efetivo total do grupo (1+2+3):

$$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc} = 144,2 + 90 + 144,2 = 378,40mm \quad (4.105)$$

Cálculo da resistência do banzo do pilar à flexão para o grupo (1+2+3):

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 378,40 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 8,60KNm \quad (4.106)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 378,40 \times 16^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 8,60KNm \quad (4.107)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times 8,60}{30,85 \times 10^{-3}} = 1114,72KN \quad (4.108)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 8,60 + 38,56 \times 6 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(30,85 + 38,56) \times 10^{-3}} = 835,71KN \quad (4.109)$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 6 \times 176,4KN = 1058,40KN \quad (4.110)$$

Cálculo da resistência do banzo do pilar à flexão para a 3ª linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3):

$$F_{T,1,Rd} = 1114,72 - (P_{r1} + P_{r2}) = 1114,72 - (305,39 + 275,40) = 533,92KN \quad (4.111)$$

$$F_{T,2,Rd} = 835,71 - (305,39 + 275,40) = 254,91KN \quad (4.112)$$

$$F_{T,3,Rd} = 1058,40 - (305,39 + 275,40) = 477,61KN \quad (4.113)$$

Finalmente, a resistência do banzo do pilar à flexão para a 3ª linha de parafusos é:

$$F_{T,Rd} = \text{mínimo}\{325,88; 305,39; 254,91\} = 2,91KN \quad (4.114)$$

4.1.4.4.2 – Componente 3 – Alma do pilar sob tração transversal

a) 3ª linha de parafusos isolada

Analogamente ao determinado para a 1ª e 2ª linha de parafusos, obtêm-se:

$$F_{t,wc,Rd} = 522,48KN \quad (4.115)$$

b) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3)

A resistência da alma do pilar à tração para o grupo de parafusos (2+3) é igual à resistência do grupo (1+2).

$$F_{t,wc,Rd} = 648,15KN \quad (4.116)$$

Resistência da alma do pilar à tração para a 3ª linha de tração como parte do grupo de parafusos (2+3):

$$F_{t,wc,Rd} = 648,15 - P_{r2} = 648,15 - 275,40 = 372,75KN \quad (4.117)$$

c) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3)

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,t,wc}t_{wc}/A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(378,40 \times 9,5/2792)^2}} = 0,56 \quad (4.118)$$

Resistência da alma do pilar à tração para o grupo de parafusos (1+2+3):

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,56 \times 378,40 \times 9,5 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 718,45KN \quad (4.119)$$

Resistência da alma do pilar à tração para a 3ª linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3):

$$F_{t,wc,Rd} = 718,45 - (P_{r1} + P_{r2}) = 718,45 - (305,39 + 275,40) = 137,66KN \quad (4.120)$$

4.1.4.4.3 – Componente 5 – Chapa de extremidade à flexão

a) 3ª linha de parafusos isolada

Sendo uma linha de parafusos interior, o comprimento efetivo é dado pelo quadro 4.10.

Quadro 4. 10: Comprimento efetivo da chapa de extremidade à flexão para a 3ª linha de parafusos isolada (ligação não reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
	$2\pi m = 2\pi \times 38,53 = 242,04mm$	$4m + 1,25e = 4 \times 38,53 + 1,25 \times 60 = 229,12mm$
Modo 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc} = 229,12mm$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp} = 242,04mm$	
Modo 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 229,12mm$	

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 229,12 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 8,13KNm \quad (4.121)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 229,12 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 8,13 KNm \quad (4.122)$$

$$n = e_{min}(60mm) \text{ mas } n < 1,25m = 1,25 \times 38,53 = 48,16mm \quad (4.123)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times 8,13}{38,53 \times 10^{-3}} = 844,41KN \quad (4.124)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 8,13 + 38,56 \times 2 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(38,53 + 48,16) \times 10^{-3}} = 383,65KN \quad (4.125)$$

$$F_{T,3,Rd} = 352,80KN \quad (4.126)$$

Verifica-se que a rotura ocorre primeiro nos parafusos, o que corresponde ao 3º modo de rotura.

b) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3)

A 3ª linha é considerada como linha de extremidade do grupo. Contudo, para considerar os efeitos do banzo da viga no comprimento efetivo da 2ª linha, esta continua a ser tomada como uma linha adjacente ao banzo tracionado.

Cálculo do comprimento efetivo da 2ª linha como parte do grupo (2+3):

$$l_{eff,nc} = 0,5p + am - (2m + 0,625e) \quad (4.127)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \times 90 + 7 \times 38,53 - (2 \times 38,53 + 0,625 \times 60) = 200,15mm \quad (4.128)$$

Cálculo do comprimento efetivo da 3ª linha como parte do grupo (2+3):

$$l_{eff,nc} = 2m + 0,625e + 0,5p = 2 \times 38,53 + 0,625 \times 60 + 0,5 \times 90 = 159,56mm \quad (4.129)$$

Cálculo do comprimento efetivo total do grupo (2+3):

$$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc} = 200,15 + 159,56 = 359,71mm \quad (4.130)$$

Cálculo da resistência da chapa de extremidade à flexão para o grupo (2+3):

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 359,71 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 12,77KNm \quad (4.131)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_0 = 0,25 \times 359,71 \times 20^2 \times 355 \times 10^{-6} / 1 = 12,77KNm \quad (4.132)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \times 12,77}{38,53 \times 10^{-3}} = 1325,69KN \quad (4.133)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 12,77 + 38,56 \times 4 \times 176,4 \times 10^{-3}}{(38,53 + 48,16) \times 10^{-3}} = 686,60KN \quad (4.134)$$

Cálculo da resistência da chapa de extremidade à flexão para a linha 3 como parte do grupo (2+3):

$$F_{T,1,Rd} = 1325,69 - P_{r2} = 1325,69 - 275,40 = 1050,29KN \quad (4.135)$$

$$F_{T,2,Rd} = 686,60 - 275,40 = 411,20KN \quad (4.136)$$

Quanto ao 3º modo de rotura, os valores correspondentes à chapa de extremidade e ao banzo do pilar são iguais. Logo:

$$F_{T,3,Rd} = 430,20KN \quad (4.137)$$

Verifica-se que a resistência da chapa de extremidade à flexão para a 3ª linha de parafusos é menos resistente quando a linha de parafusos atua isoladamente.

4.1.4.4.4 – Componente 8 – Alma da viga em tração

a) 3ª linha de parafusos isolada

$$b_{eff,t,wb} = l_{eff,1} = 229,12mm \quad (4.138)$$

Cálculo da resistência da alma da viga à tração:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{229,12 \times 7,1 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 577,50KN \quad (4.139)$$

b) 3ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3)

Cálculo da resistência da alma da viga à tração para o grupo (2+3):

$$b_{eff,t,wb} = \sum l_{eff,1} = 359,71mm \quad (4.140)$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{359,71 \times 7,1 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 906,65KN \quad (4.141)$$

Cálculo da resistência da alma da viga à tração para a 3ª linha como parte do grupo (2+3):

$$F_{t,wb,Rd} = 906,65 - P_{r2} = 906,65 - 275,40 = 631,25KN \quad (4.142)$$

4.1.4.3.5 – Resistência da 3ª linha de tração

Verifica-se que a componente condicionante da 3ª linha de parafusos, é a alma do pilar à tração para o grupo de parafusos (1+2+3).

$$P_{r3} = 137,66KN \quad (4.143)$$

4.1.4.5 – 4ª linha de parafusos tracionados

O cálculo da resistência das componentes da 4ª linha de parafusos não é explicitado neste trabalho (à exceção da chapa de extremidade à flexão para o grupo de parafusos (2+3+4)), pois é idêntico aos das linhas anteriores. Contudo, os resultados dos cálculos manuais e do Powerconnect são apresentados nos quadros A.1 e A.2.

4.1.4.5.1 – Componente 5 – Chapa de extremidade à flexão

4ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3+4)

$$p_{2-3} = 90mm \quad (4.144)$$

$$p_{3-4} = 109,30mm \quad (4.145)$$

A 3ª linha é uma linha interior do grupo, enquanto que a 2ª e 4ª linha são adjacentes ao banzo da viga.

Cálculo do comprimento efetivo da 2ª linha como parte do grupo (2+3+4):

O comprimento efetivo da 2ª linha é calculado da mesma forma que para o grupo (2+3). Logo:

$$l_{eff,nc} = 200,15mm \quad (4.146)$$

Cálculo do comprimento efetivo da 3ª linha como parte do grupo (2+3+4):

$$l_{eff,nc} = p = \frac{p_{2-3}}{2} + \frac{p_{3-4}}{2} = \frac{90}{2} + \frac{109,3}{2} = 99,65mm \quad (4.147)$$

Cálculo do comprimento efetivo da 4ª linha como parte do grupo (2+3+4):

Como os valores de e , m_2 e m são iguais aos da 2ª linha de parafusos, o valor de α também é igual ao obtido para essa linha. Assim:

$$l_{eff,nc} = 0,5p_{3-4} + \alpha m - (2m + 0,625e) \quad (4.148)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \times 109,3 + 7 \times 38,53 - (2 \times 38,53 + 0,625 \times 60) = 209,8mm \quad (4.149)$$

Cálculo do comprimento efetivo total do grupo (2+3+4):

$$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc} = 200,15 + 99,65 + 209,8 = 509,6mm \quad (4.150)$$

Cálculo da resistência da chapa de extremidade à flexão para o grupo (2+3+4):

Utilizando a formulação apresentada no ponto 2.3.2 obtêm-se os seguintes resultados:

$$F_{T,1,Rd} = 1878,10KN \quad (4.151)$$

$$F_{T,2,Rd} = 1005,35KN \quad (4.152)$$

$$F_{T,3,Rd} = 1058,40KN \quad (4.153)$$

4.1.4.5.2 – Valor resistente da 4ª linha de tração

Dos quadros A.1 e A.2 conclui-se que a resistência da 4ª linha de parafusos é condicionada pela resistência da alma da coluna à tração para o grupo de parafusos (1+2+3+4).

$$P_{r4} = 50,11KN \quad (4.154)$$

4.1.5 – Cálculo do momento resistente da ligação

4.1.5.1 – Momento resistente dado pelas componentes calculadas no capítulo 4.1.4.

O cálculo do momento resistente da ligação é feito de acordo com o ponto 2.5.2.2:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (4.155)$$

Em que a força de tração de cada linha de parafusos, $F_{tr,Rd}$, equivale à sua componente menos resistente, P_{rn} , e o braço, h_r , equivale à distância entre o centro geométrico dos parafusos e o centro de compressão.

Quadro 4.11: Valor resistente de cada linha de tração (ligação não reforçada)

Linha	$F_{tr,Rd} (KN)$	$h_r (mm)$
1	305,39	334,3
2	275,40	244,3
3	137,66	154,3
4	50,11	45

Contudo é necessário lembrar que para se verificar o equilíbrio de forças, o somatório das forças de tração não pode ultrapassar a força de compressão máxima, que neste caso é equivalente à resistência da alma do pilar ao esforço transversal.

$$\sum_r F_{tr,Rd} = F_{cr,Rd} = V_{wp,Rd} = 515,02KN \quad (4.156)$$

Assim, é imperativo verificar, linha a linha, se o somatório das forças de tração ultrapassa ou não o valor de resistência da ligação à compressão.

a) 1ª Linha:

$$\sum_r F_{tr,Rd} = 305,39KN < 515,02KN \quad (4.157)$$

Nestas condições, a resistência da 1ª linha de parafusos à tração é aproveitada na sua totalidade.

b) 2ª Linha:

$$\sum_r F_{tr,Rd} = 305,39 + 275,40 = 580,79KN > 515,02KN \quad (4.158)$$

Logo, a 3ª linha de parafusos não irá contribuir para o momento resistente da ligação e o valor resistente da 2ª linha de parafusos tem de ser reduzido para o sistema verificar o equilíbrio.

$$F_{t2,Rd} = F_{cr,Rd} - F_{t1,Rd} = 515,02 - 305,39 = 209,63KN \quad (4.159)$$

Finalmente, o momento resistente da ligação é dado por:

$$M_{j,Rd} = h_1 F_{t1,Rd} + h_2 F_{t2,Rd} = (305,39 \times 334,3 + 209,63 \times 244,3) \times 10^{-3} = 153,30KNm \quad (4.160)$$

4.1.5.2 – Momento resistente absorvido pelos cordões de soldadura

Adotando um método simplificativo, admite-se que os cordões de soldadura que resistem às forças de tração provocadas por um momento atuante negativo são os cordões que ligam o banzo superior e a alma da viga à chapa de extremidade. Assim, para este caso de estudo em particular, considera-se que os cordões de soldadura resistentes às forças de tração estão divididos em três grupos, cada um caracterizado por um centro de tração diferente e consequentemente um braço do binário diferente até ao centro de compressão da ligação, como está representado na figura 4.4.

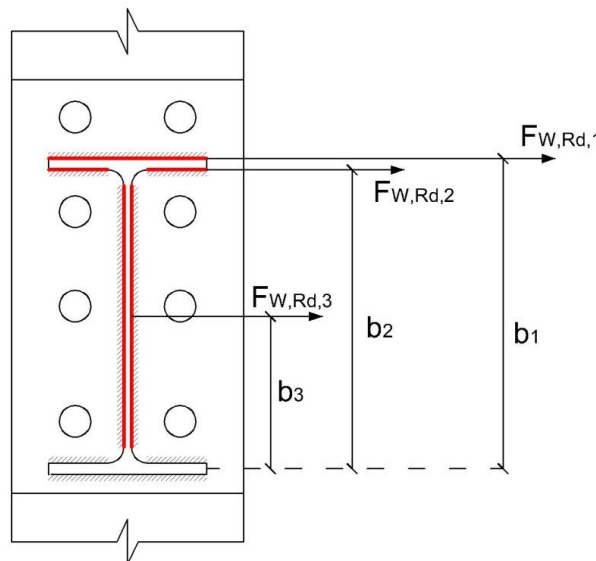


Figura 4.4: Cordões de soldadura sujeitos à tração

Cálculo da resistência da soldadura por unidade de comprimento (ver ponto 2.4.10):

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490/\sqrt{3}}{0,9 \times 1,25} = 251,47 \times 10^3 \text{ KN/m}^2 \quad (4.161)$$

Para uma espessura dos cordões de 7mm, tem-se:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \times a = 251,47 \times 7 = 1,76 \times 10^3 \text{ KN/m} \quad (4.162)$$

Cálculo da carga concentrada correspondente a cada grupo de cordões de soldadura:

- 1º Grupo:

O primeiro grupo de soldaduras está situado no limite superior do banzo superior da viga. Assim, o comprimento efetivo do cordão de soldadura, $l_{w,eff,1}$, o braço do binário que vai do centro de tração deste grupo ao centro de compressão, b_1 , e a carga concentrada atuante no centro de tração, $F_{W,Rd,1}$, são dados por:

$$l_{w,eff,1} = b_b = 150 \text{ mm} \quad (4.163)$$

$$b_1 = h_b - \frac{t_{fb}}{2} = 300 - \frac{10,7}{2} = 294,65 \text{ mm} \quad (4.164)$$

$$F_{W,Rd,1} = F_{w,Rd} \times l_{w,eff,1} = 1,76 \times 150 = 264 \text{ KN} \quad (4.165)$$

Onde b_b representa a largura do banzo da viga.

- 2º Grupo:

O segundo grupo de soldaduras está situado no limite inferior do banzo superior da viga. Para este grupo, o comprimento efetivo, $l_{w,eff,2}$, o braço do binário, b_2 , e a resistência da soldadura à tração, $F_{W,Rd,2}$, são dados por:

$$l_{w,eff,2} = b_b - 2r_b - t_{wb} = 150 - 2 \times 15 - 7,1 = 112,9 \text{ mm} \quad (4.166)$$

$$b_2 = h_b - \frac{3t_{fb}}{2} = 300 - \frac{3 \times 10,7}{2} = 283,95 \text{ mm} \quad (4.167)$$

$$F_{W,Rd,2} = F_{w,Rd} \times l_{w,eff,2} = 1,76 \times 112,9 = 198,70 \text{ KN} \quad (4.168)$$

- 3º Grupo:

O terceiro grupo de soldaduras corresponde às soldaduras situadas em ambos os lados da alma da viga. Naturalmente, o centro de tensões deste grupo situa-se a meia altura da viga. Logo:

$$l_{w,eff,3} = 2 \times (h_b - 2r_b - 2t_{fb}) = 2 \times (300 - 2 \times 15 - 2 \times 10,7) = 497,2 \text{ mm} \quad (4.169)$$

$$b_3 = \frac{h_b}{2} - \frac{t_{fb}}{2} = \frac{300}{2} - \frac{10,7}{2} = 129,65 \text{ mm} \quad (4.170)$$

$$F_{w,Rd,3} = F_{w,Rd} \times l_{w,eff,3} = 1,76 \times 497,2 = 875,07KN \quad (4.171)$$

Cálculo do momento resistente absorvido pelos cordões de soldadura, $M_{w,Rd}$:

$$M_{w,Rd} = b_1 F_{w,Rd,1} + b_2 F_{w,Rd,2} + b_3 F_{w,Rd,3} \quad (4.172)$$

$$M_{w,Rd} = (294,65 \times 264 + 283,95 \times 198,70 + 129,65 \times 875,07) \times 10^3 = 247,66KNm \quad (4.173)$$

Como $M_{w,Rd} \geq M_{j,Rd}$, considera-se que o momento resistente da ligação é igual a $M_{j,Rd}$.

4.1.6 – Verificação de segurança à flexão

O esforço axial atuante na ligação é inferior a 5% da resistência ao esforço normal do elemento a ligar. Com efeito:

$$N_{j,Ed} = 66,60KN < N_{pl,Rd} \times 5\% = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{53,81 \times 355 \times 10^{-1}}{1} \times 0,05 = 95,51KN \quad (4.174)$$

Assim de acordo com o ponto 2.5.1, a segurança da junta é garantida se:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1 \quad (4.175)$$

Contudo, neste caso:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{165}{153,30} = 1,08 > 1 \quad (4.176)$$

A condição não se verifica, logo não está verificada a segurança da ligação à flexão.

4.1.7 – Verificação de segurança ao esforço transversal

4.1.7.1 – Parafusos ao corte

A resistência dos parafusos ao corte é calculada através das seguintes expressões indicadas no ponto 2.4.11:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \times 1000 \times 245 \times 10^{-3}}{1,25} = 98KN \quad (4.177)$$

Tendo em conta que as duas primeiras linhas de parafusos se encontram à tração é necessário ter em conta a combinação de corte e tração dada pelas equações 2.44 e 2.45. Assim, as forças de corte máximas na 1ª e 2ª linha de tração são dadas por:

1ª linha de parafusos:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \times 2 \times \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \times 2 \times F_{t,Rd}}\right) = 98 \times 2 \times \left(1 - \frac{305,39}{1,4 \times 2 \times 176,4}\right) = 74,81KN \quad (4.178)$$

2ª linha de parafusos:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \times 2 \times \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \times 2 \times F_{t,Rd}}\right) = 98 \times 2 \times \left(1 - \frac{209,63}{1,4 \times 2 \times 176,4}\right) = 112,81KN \quad (4.179)$$

Como os 4 parafusos inferiores não se encontram à tração, a resistência total dos parafusos ao corte é dada por:

$$F_{V,Rd} = 98 \times 4 + 74,81 + 112,81 = 579,63KN \geq V_{Ed} = 117KN \quad (4.180)$$

Está pois verificada a segurança dos parafusos ao corte.

4.1.7.2 – Cordões de soldadura ao corte

Devido aos pressupostos assumidos no capítulo 4.1.5.2, os cordões de soldadura resistentes ao corte são os que ligam o banzo inferior da viga à placa de extremidade. Dado que o valor resistente dos cordões de soldadura ao corte e à tração por unidade de comprimento são iguais, a resistência total ao corte das soldaduras é dada pelas seguintes expressões:

$$l_{eff} = 2b_b - 2r_b - t_{wb} = 2 \times 150 - 2 \times 15 - 7,1 = 262,9mm \quad (4.181)$$

$$F_{W,Rd} = F_{w,Rd} \times l_{eff} = 1,76 \times 262,9 = 462,70KN \geq V_{Ed} = 117KN \quad (4.182)$$

Verifica-se também a segurança dos cordões de soldadura ao corte.

4.1.8 – Cálculo da rigidez axial das componentes

O cálculo da rigidez axial das componentes é feito de acordo com o quadro 2.8. Contudo, só as linhas que se encontram à tração ou à compressão é que conferem rigidez à junta. Logo, os eixos de parafusos 3 e 4 não devem ser considerados. As componentes com rigidez axial infinita (componentes 7 e 8) também não necessitam de ser consideradas.

4.1.8.1 – Componente 1 – Alma do pilar sujeita ao esforço transversal

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta_z} = \frac{0,38 \times 27,92 \times 10^2}{1 \times (300 - 10,7)} = 3,67mm \quad (4.183)$$

4.1.8.2 – Componente 2 – Alma do pilar sujeita a compressão transversal

$$k_2 = \frac{0,7b_{eff,c,wc}t_w}{d_c} = \frac{0,7 \times 220,50 \times 9,5}{152} = 9,65mm \quad (4.184)$$

4.1.8.3 – Componente 3 – Alma do pilar sujeita a tração transversal

No caso das componentes das linhas de tração, deve sempre ser considerado o comprimento efetivo mais curto, normalmente das linhas de parafusos como parte de um grupo.

1ª Linha de parafusos como parte de um grupo:

$$k_{3.1} = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_w}{d_c} = \frac{0,7 \times 142,2 \times 9,5}{152} = 6,31mm \quad (4.185)$$

2ª Linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3+4) ou (1+2+3):

$$k_{3.2} = \frac{0,7b_{\text{eff},t,w}t_w}{d_c} = \frac{0,7 \times 90 \times 9,5}{152} = 3,94\text{mm} \quad (4.186)$$

4.1.8.3 – Componente 4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

1ª Linha de parafusos como parte de um grupo:

$$k_{4.1} = \frac{0,9l_{\text{eff}} t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 142,2 \times 16^3}{30,85^3} = 18,11\text{mm} \quad (4.187)$$

2ª Linha de parafusos como parte do grupo (1+2+3+4) ou (1+2+3):

$$k_{4.2} = \frac{0,9l_{\text{eff}} t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 90 \times 16^3}{30,85^3} = 11,30\text{mm} \quad (4.188)$$

4.1.8.5 – Componente 5 – Chapa de extremidade à flexão

1ª Linha de parafusos isolada:

$$k_{5.1} = \frac{0,9l_{\text{eff}} t_p^3}{m_x^3} = \frac{0,9 \times 110 \times 20^3}{31,73^3} = 24,79\text{mm} \quad (4.189)$$

2ª Linha de parafusos como parte de um grupo:

$$k_{5.2} = \frac{0,9l_{\text{eff}} t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 200,15 \times 20^3}{38,53^3} = 25,19\text{mm} \quad (4.190)$$

4.1.8.6 – Componente 10 – parafusos à tração

$$k_{10.1} = k_{10.2} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6 \times 245}{54,5} = 7,19\text{mm} \quad (4.191)$$

4.1.9 – Cálculo da rigidez rotacional da junta

As expressões utilizadas para determinar a rigidez rotacional da junta encontram-se descritas no ponto 2.7.

Cálculo da rigidez efetiva da 1ª linha de parafusos:

$$k_{\text{eff},1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3.1}} + \frac{1}{k_{4.1}} + \frac{1}{k_{5.1}} + \frac{1}{k_{10.1}}} = \frac{1}{\frac{1}{6,31} + \frac{1}{18,11} + \frac{1}{24,79} + \frac{1}{7,19}} = 2,54\text{mm} \quad (4.192)$$

Cálculo da rigidez efetiva da 2ª linha de parafusos:

$$k_{\text{eff},2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3.2}} + \frac{1}{k_{4.2}} + \frac{1}{k_{5.2}} + \frac{1}{k_{10.2}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,94} + \frac{1}{11,30} + \frac{1}{25,19} + \frac{1}{7,19}} = 1,92\text{mm} \quad (4.193)$$

Cálculo do braço do binário equivalente:

$$z_{\text{eq}} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r^2}{\sum_r k_{\text{eff},r}} = \frac{2,54 \times 334,3^2 + 1,92 \times 244,3^2}{2,54 \times 334,3 + 1,92 \times 244,3} = 302,32\text{mm} \quad (4.194)$$

Cálculo da rigidez equivalente das linhas de parafusos à tração:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} = \frac{2,54 \times 334,3 + 1,92 \times 244,3}{302,32} = 4,36mm \quad (4.195)$$

Cálculo da rigidez rotacional inicial da ligação:

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} = \frac{Ez^2}{\mu \times \left(\frac{1}{k_{eq}} + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)} = \frac{210 \times 302,39^2}{1 \times \left(\frac{1}{4,42} + \frac{1}{3,67} + \frac{1}{9,67} \right)} \times 10^3 \quad (4.196)$$

$$S_{j,ini} = 31719,34KNm/Rad \quad (4.197)$$

Cálculo da rigidez rotacional reduzida da ligação, S_j :

Para uma ligação aparafusada viga-pliar com chapa de extremidade, o quadro 2.10 indica que:

$$\eta = 2 \quad (4.198)$$

$$S_j = S_{j,ini}/\eta = \frac{31719,34}{2} = 15859,67KNm/Rad \quad (4.199)$$

4.1.10 – Curva momento rotação da curva

Os procedimentos necessários para representar a aproximação trilinear da curva momento-rotação de uma junta, encontram-se descritos no ponto 2.9.

Em primeiro lugar, é necessário calcular o momento atuante quando é atingido o limite da relação linear entre o momento fletor atuante e a rotação resultante, ($M_{Ed} = 2/3M_{j,Rd}$), assim como a rotação correspondente. Por último é necessário calcular a rotação correspondente ao momento resistente.

Cálculo da rotação da ligação correspondente à passagem de um comportamento linear para um comportamento não linear:

$$\phi_{j,el} = \frac{2/3M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} = \frac{102,20}{31719,34} = 3,22 \times 10^{-3}Rad \quad (4.200)$$

Cálculo da rotação da ligação quando é atingido o momento resistente:

$$\phi_{j,Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} = \frac{153,30}{15859,67} = 9,67 \times 10^{-3}Rad \quad (4.201)$$

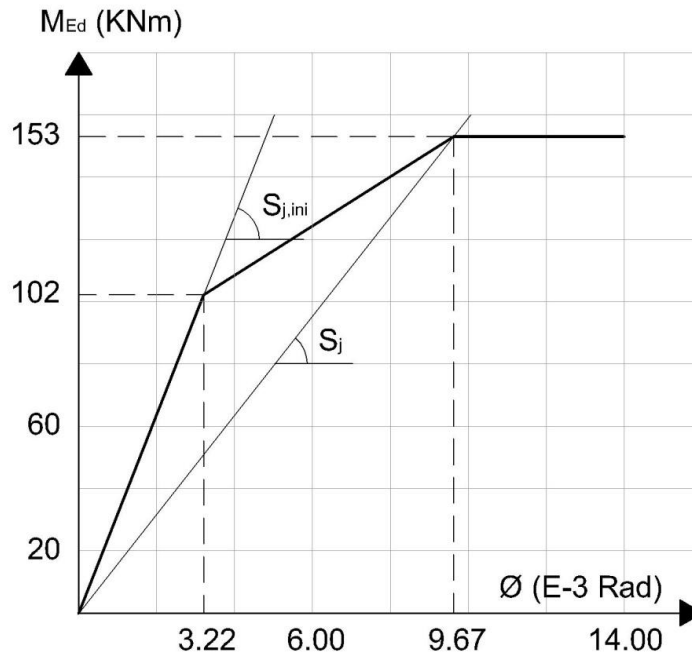


Figura 4.5: Curva momento rotação do primeiro caso de estudo

4.1.11 – Classificação da ligação quanto à sua rigidez

De acordo com o ponto 2.10, a ligação pode ser classificada como articulada, semi-rígida ou rígida:

- Ligação articulada:

$$S_{j,ini} \leq 0,5EI_b/L_b \quad (4.202)$$

$$S_{j,ini} = 31877,08 \text{ KNm/Rad} > \frac{0,5 \times 210 \times 8356 \times 10^{-2}}{10} = 877,38 \text{ KNm/Rad} \quad (4.203)$$

Como esta condição não se verifica, a ligação não é articulada.

- Ligação semi-rígida:

Considerando que as vigas e os pilares da estrutura têm todas as mesmas dimensões:

$$K_b = I_b/L_b = \frac{8356 \times 10^{-8}}{10} = 8,36 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.204)$$

$$K_c = I_c/L_c = \frac{8091 \times 10^{-8}}{2,5} = 3,24 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (4.205)$$

$$\frac{K_b}{K_c} = \frac{8,36 \times 10^{-6}}{3,24 \times 10^{-5}} = 0,26 \geq 0,1 \quad (4.206)$$

$$k_b = 25 \quad (4.207)$$

$$0,5EI_b/L_b < S_{j,ini} < k_bEI_b/L_b$$

$$(=) 877,38KNm/Rad < 31877,08KNm/Rad < \frac{25 \times 210 \times 8356 \times 10^{-2}}{10} = 43869KNm/Rad \quad (4.208)$$

Logo a ligação é classificada como semi-rígida.

4.1.12 – Comparação dos resultados calculados manualmente com os do Powerconnect

Em geral os resultados do cálculo manual são muito semelhantes aos fornecidos pelo Powerconnect (ver quadros A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 no anexo). Analisando a ligação a um nível global e tomando os valores dos cálculos manuais como referência, verifica-se através das seguintes expressões que o erro relativo associado aos resultados do Powerconnect é geralmente inferior a 1%:

$$M_{j,Rd,Pc} = 153,1KNm \quad (4.209)$$

$$\varepsilon_{M,Rd} = \frac{|M_{j,Rd,C.M} - M_{j,Rd,Pc}|}{M_{j,Rd,cm}} \times 100 = \frac{|153,3 - 153,1|}{153,3} \times 100 = 0,13\% \quad (4.210)$$

$$S_{j,ini,Pc} = 31731KNm/Rad \quad (4.211)$$

$$\varepsilon_{S,ini} = 0,04\% \quad (4.212)$$

$$S_{j,Pc} = 15866KNm/Rad \quad (4.213)$$

$$\varepsilon_S = 0,04\% \quad (4.214)$$

Onde:

$M_{j,Rd,Pc}$ – Momento resistente da ligação modelada no Powerconnect;

$M_{j,Rd,c.m}$ – Momento resistente de cálculo da ligação;

$\varepsilon_{M,Rd}$ – Erro relativo do momento resistente indicado pelo Powerconnect;

$S_{j,ini,Pc}$ – Rigidez rotacional inicial da ligação modelada no Powerconnect

$\varepsilon_{S,ini}$ – Erro relativo da rigidez rotacional inicial do Powerconnect;

$S_{j,Pc}$ – Rigidez rotacional reduzida da ligação modelada no Powerconnect;

ε_S – Erro relativo da rigidez rotacional reduzida do Powerconnect.

Quanto à comparação do valor resistente de cada componente e respetiva rigidez, os resultados também são muito idênticos como se pode verificar nos quadros A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5. Contudo para algumas componentes, verificaram-se algumas discrepâncias entre os valores obtidos manualmente e os resultados do programa.

- Componente 7 – Banzo e alma da viga em compressão:

Apesar de em ambos os casos a rigidez ser considerada infinita, o valor resistente desta componente apresenta um erro relativo de 15,76%. Possivelmente o programa de cálculo automático

considera o momento resistente elástico da viga em vez de considerar o plástico. Para verificar esta possibilidade, é necessário calcular a resistência desta componente partindo do mesmo pressuposto.

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{557,1 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 197,77 KNm \quad (4.215)$$

$$F_{c,fb,Rd,c.m} = \frac{M_{b,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{223,08}{(300 - 10,7) \times 10^{-3}} = 683,61 KN \quad (4.216)$$

$$\varepsilon_{Fc,fb} = \frac{|F_{c,fb,Rd,c.m} - F_{c,fb,Rd,Pc}|}{F_{c,fb,Rd,c.m}} \times 100 = \frac{|683,61 - 649,6|}{683,61} \times 100 = 4,98\% \quad (4.217)$$

$F_{c,fb,Rd,c.m}$ – Resistência de cálculo do banzo e alma da viga à compressão

$F_{c,fb,Rd,Pc}$ – Resistência obtida no Powerconnect do banzo e alma da viga à compressão

$\varepsilon_{Fc,fb}$ – Erro relativo da resistência do banzo e alma da viga à compressão do Powerconnect, considerando uma distribuição de esforços elástica.

Apesar de os valores ficarem mais aproximados, o erro é demasiado elevado para se tirar conclusões.

- Componente 10 – Parafusos à tração:

Neste caso não existe diferença entre os valores resistentes desta componente do programa de cálculo automático e os cálculos manuais. Contudo verifica-se uma diferença acentuada na rigidez da componente, apresentando-se um erro de 12,66%. A razão para esta disparidade de resultados é desconhecida.

- Componentes 3, 4, 5 e 8 – Componentes que perfazem o modelo T-stub equivalente:

No programa de cálculo automático não é apresentada a resistência destas componentes para uma linha de parafusos atuando como parte de um grupo de parafusos, ou seja, a resistência dada pelo programa é apenas referente a cada linha de parafusos isolada ou a um grupo de parafusos na sua totalidade.

- Componente 19 – Resistência das soldaduras (neste caso, à tração).

O programa de cálculo automático atribui um valor resistente das soldaduras à tração para cada linha de parafusos. Esta metodologia não foi utilizada nos cálculos efetuados de acordo com a formulação preconizada no EC3, por não se ter encontrado referências que a justifiquem.

- Resistência da ligação ao esforço transversal – Soldaduras ao corte

Quando comparadas as resistências dos cordões de soldadura ao corte fornecidas pelo programa de cálculo automático, e pelos cálculos manuais, verifica-se um erro relativo de quase 100%. Uma hipótese justificativa para esta ocorrência, é de que a estimativa do comprimento efetivo das soldaduras que resistem ao corte tenha sido muito conservadora nos cálculos manuais.

4.2 – Ligação aparafusada reforçada com chapa de extremidade

4.2.1 – Soluções de reforço consideradas

Analisando os resultados do Powerconnect e dos cálculos manuais referentes ao caso de estudo do capítulo 4.1, são tiradas as seguintes conclusões:

- A força máxima que pode ser exercida na 1ª linha de tração corresponde à resistência da chapa de extremidade à flexão.
- A resistência da 2ª linha de tração não é completamente rentabilizada devido à limitação das forças de tração imposta pela necessidade de garantir o equilíbrio de forças.
- A força máxima que pode ser exercida na linha de compressão corresponde à resistência da alma do pilar ao esforço transversal.

Assim, de forma a aumentar a resistência da ligação à flexão, consideraram-se as seguintes opções:

1. Reforçar a chapa de extremidade através de uma chapa de gusset (ver figura 4.6):

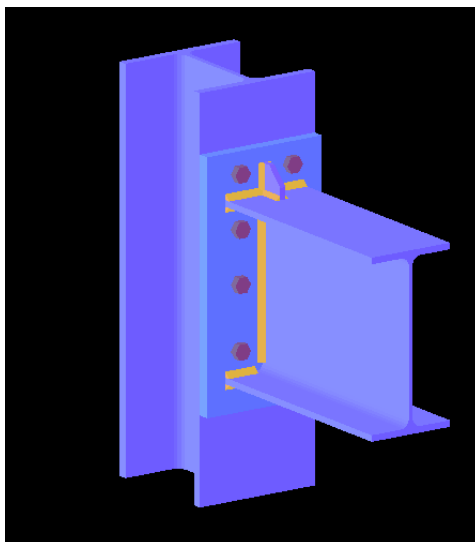


Figura 4.6: Ligação reforçada com chapa de gusset

Ao reforçar-se a ligação com uma chapa de gusset superior, a resistência da chapa de extremidade à flexão para a 1ª linha de parafusos aumenta. Contudo, para que seja mantido o equilíbrio entre as forças de tração e compressão, a contribuição da resistência da 2ª linha de parafusos acaba por ser reduzida.

Assim, a resistência da ligação à flexão indicada pelo Powerconnect aumenta, mas não o suficiente para que seja verificada a segurança:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{165}{155,20} = 1,06 > 1 \quad (4.218)$$

2. Aumentar o braço binário através de um esquadro de reforço (ver figura 4.7):

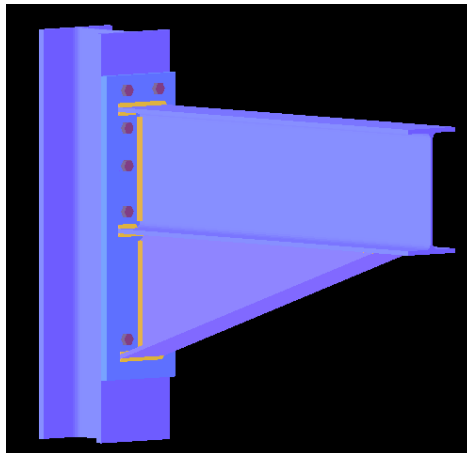


Figura 4.7: Ligação reforçada com esquadro de reforço

Neste caso, a resistência das componentes não se altera. Contudo, o centro de compressão passa a localizar-se a meio da espessura do banzo inferior do esquadro de reforço, aumentando assim o braço do binário e consequentemente o momento resistente da ligação.

Adotando esta solução, a segurança da ligação à flexão fica verificada. Contudo, a ligação passa a estar sobredimensionada pois:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{165}{273,9} = 0,60 \leq 1 \quad (4.219)$$

3. Reforçar a alma do pilar com uma chapa de alma só de um lado (ver figura 4.8):

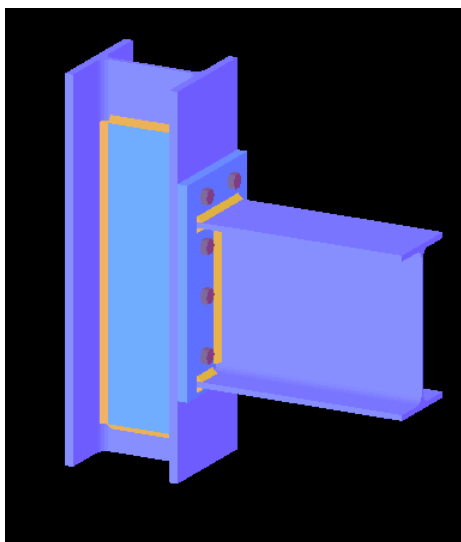


Figura 4.8: Ligação reforçada com chapa de alma no pilar

A adoção desta solução afeta o valor resistente de muitas componentes, mas principalmente aumenta a resistência da alma do pilar ao esforço transversal. Como consequência, a resistência da

linha de compressão também aumenta, permitindo assim aumentar a contribuição da 2ª e 3ª linha de tração para a resistência da ligação à flexão.

Desta forma, a junta passa a verificar a segurança, por uma pequena margem. Assim:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{165}{179,8} = 0,92 \leq 1 \quad (4.220)$$

4.2.2 – Descrição da solução de reforço atribuída

De forma a aumentar não apenas a resistência da ligação à flexão mas também a sua rigidez de rotação, optou-se por reforçar a ligação com uma chapa de alma no pilar e com reforços transversais no pilar, ao nível dos banzos superior e inferior da viga.

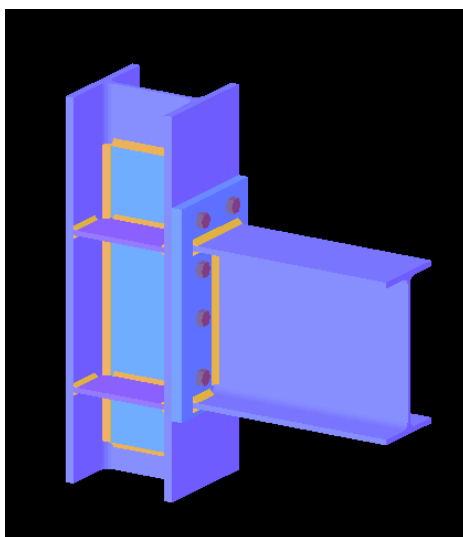


Figura 4.9: Ligação reforçada com chapa de alma e placas transversais no pilar

De forma a respeitar as condições do ponto 2.4.1.2, a chapa de alma estende-se entre o limite dos raios de concordância do pilar e tem uma espessura igual à da alma do pilar. Logo:

$$t_s = 9,5mm \quad (4.221)$$

$$b_s = h_c - 2 \times (t_{fc} + r_c) = 220 - 2 \times (16 + 18) = 152mm \quad (4.222)$$

Para garantir que os comprimentos efetivos da alma do pilar à tração e compressão, estão dentro dos limites do reforço, a chapa de alma tem uma extensão superior de 56mm e uma extensão inferior de 97mm para lá do limite da chapa de extremidade (valores recomendados pelo Powerconnect).

Os reforços transversais têm uma espessura de 10,7mm (tal como o banzo da viga) e estão geometricamente alinhados com os banzos da viga. Todas as peças de reforço são de aço S355 e todos os cordões de soldadura considerados têm 7mm de espessura.

Desta forma, de acordo com o Powerconnect, as características globais da ligação passam a ser as seguintes:

$$M_{j,Rd,Pc} = 185,4KNm \quad (4.223)$$

$$S_{j,ini,Pc} = 136029KNm/Rad \quad (4.224)$$

$$S_{j,Pc} = 68014KNm/Rad \quad (4.225)$$

Quanto à segurança à flexão, é verificada, pois:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{165}{185,4} = 0,89 \leq 1 \quad (4.226)$$

4.2.3 – Cálculo da resistência das componentes

4.2.3.1 – Componentes inalteradas

Devido à natureza dos reforços considerados, a resistência de algumas componentes não é alterada quando comparada com o caso da ligação não reforçada (como por exemplo o banzo e alma da viga em compressão e a chapa de extremidade em flexão para linhas isoladas). Devido às considerações do ponto 2.3.3, para linhas de parafusos que atuam como parte de um grupo, existem algumas componentes (chapa de extremidade em flexão e alma da viga à tração) cujo valor resistente pode diferir um pouco com os reforços atribuídos. Contudo, o método de cálculo e as grandezas que influenciam os cálculos são os mesmos que foram considerados no ponto 4.1. O valor resistente destas componentes pode ser consultado nos quadros A.6 e A.7.

4.2.3.2 – Componentes na linha de compressão

4.2.3.2.1 – Componente 1 – Alma do pilar ao esforço transversal

Cálculo da área resistente ao corte da alma da coluna:

$$A_{vc} = 27,92 + b_s t_{wc} = 27,92 + 152 \times 9,5 \times 10^{-2} = 42,36cm^2 \quad (4.227)$$

Resistência da alma do pilar ao esforço transversal:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \times 355 \times 42,36 \times 10^{-1}}{\sqrt{3} \times 1} = 781,39KN \quad (4.228)$$

Resistência adicional do pilar ao corte devido aos reforços transversais:

Para simplificar os cálculos, considerou-se que a largura do reforço transversal é igual à largura do pilar.

$$M_{pl,fc,Rd} = w_{pl,fc} f_{y,fc} = \frac{b_{fc} t_{fc}^2}{4} f_{y,fc} = \frac{220 \times 16^2}{4} \times 355 \times 10^{-6} = 5,01KNm \quad (4.229)$$

$$M_{pl,st,Rd} = w_{pl,st} f_{y,st} = \frac{b_{st} t_{st}^2}{4} f_{y,st} = \frac{220 \times 10,7^2}{4} \times 355 \times 10^{-6} = 2,24KNm \quad (4.230)$$

Em que:

$w_{pl,st}$ – Módulo plástico da chapa de reforço transversal

$f_{y,st}$ – Tensão de cedência da chapa de reforço transversal

$w_{pl,fc}$ – Módulo plástico do banzo do pilar

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s} \quad (4.231)$$

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4 \times 5,01}{(300 - 10,7) \times 10^{-3}} = 69,27KN > \frac{2 \times 2,24 + 2 \times 5,01}{(300 - 10,7) \times 10^{-3}} = 50,12KN \quad (4.232)$$

Resistência total do pilar ao esforço transversal:

$$V_{wp,Rd} + V_{wp,add,Rd} = 781,39KN + 50,12KN = 831,51KN \quad (4.233)$$

4.2.3.2.2 – Componente 2 – Alma do pilar sujeita a compressão transversal

Do ponto 2.4.2, sabe-se que para efeitos de cálculo da resistência da alma do pilar à compressão transversal, quando esta é reforçada em apenas um lado, a espessura efetiva da alma do pilar, $t_{wc,eff}$, deve ser tomada como:

$$t_{wc,eff} = 1,5t_{wc} = 1,5 \times 9,5 = 14,25mm \quad (4.234)$$

O comprimento efetivo da alma do pilar à compressão transversal não é alterado pelos reforços introduzidos, toma-se assim o valor do caso de estudo anterior:

$$b_{eff,c,wc} = 220,50mm \quad (4.235)$$

Cálculo do coeficiente de redução, ω :

$$\beta = 1 \quad (4.236)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc}t_{w,eff}/A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(220,50 \times 14,25/4236)^2}} = 0,764 \quad (4.237)$$

Cálculo do coeficiente de redução, ρ :

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_c f_{y,wc}}{Et_{wc}^2}} = 0,932 \sqrt{\frac{220,5 \times 152 \times 355 \times 10^{-3}}{210 \times 14,25^2}} = 0,49 \leq 0,72 \quad (4.238)$$

Logo:

$$\rho = 1 \quad (4.239)$$

Cálculo do coeficiente de redução, k_{wc} :

Com a adição de uma chapa de alma, a área efetiva da secção do pilar à compressão e o módulo elástico de flexão do pilar aumentam. Assim, a tensão de compressão máxima no pilar, $\sigma_{com,Ed}$, diminui em comparação com o primeiro caso de estudo. Logo, do ponto 4.1.4.1.2, conclui-se que $k_{wc} = 1$.

Cálculo da resistência da alma do pilar à compressão transversal com chapa de reforço de um lado:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{w,eff} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{w,eff} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (4.240)$$

Como $\gamma_{M1} = \gamma_{M0} = 1$ e $\rho = 1$:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,764 \times 1 \times 1 \times 220,50 \times 14,25 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 852,21KN \quad (4.241)$$

Cálculo da resistência do reforço transversal à compressão:

Neste caso, de forma não contabilizar duas vezes a resistência da alma do pilar e da chapa de reforço longitudinal à compressão, é necessário retirar o valor das espessuras da alma e da chapa de alma do pilar ao comprimento do reforço transversal. Assim:

$$N_{pl,st,Rd} = \frac{A_{st} f_{y,st}}{\gamma_{M0}} = \frac{(b_{st} - t_{wc} - t_s) \times t_{st} \times f_{y,st}}{\gamma_{M0}} = \frac{(220 - 9,5 \times 2) \times 10,7 \times 355 \times 10^{-3}}{1} \quad (4.242)$$

$$N_{pl,st,Rd} = 763,50KN \quad (4.243)$$

Cálculo da resistência da alma do pilar à compressão transversal com chapa de reforço longitudinal de um lado e com chapa de reforço transversal:

$$F_{c,wc,Rd} + N_{pl,st,Rd} = 852,21 + 763,50 = 1615,71KN \quad (4.244)$$

4.2.3.3 – Componentes nas linhas de tração

4.2.3.3.1 – Componente 4 – Banzo do pilar sujeito a flexão transversal

A diferença entre os métodos de cálculo para este caso de estudo e o primeiro (ligação não reforçada) consiste na utilização das fórmulas do quadro 2.5 em vez do quadro 2.4 para determinação do comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão. Depois de determinado o comprimento efetivo de cada linha ou grupo de parafusos, o cálculo da força de tração correspondente é igual ao considerado para o primeiro caso de estudo, utilizando o quadro 2.1. Devido à semelhança de cálculos entre os dois casos de estudo, são apenas apresentados os cálculos do comprimento efetivo das linhas/grupos de parafusos 1,2 e 2+3+4.

a) 1ª linha de parafusos isolada:

Trata-se de uma linha de parafusos de extremidade adjacente a um reforço, por isso não pode atuar como parte de um grupo de parafusos com as outras linhas de tração. As propriedades geométricas consideradas na determinação do comprimento efetivo para esta componente são as mesmas que foram consideradas no primeiro caso de estudo em 4.1.4.2.1 com a adição da distância m_2 e do coeficiente α , que dependem da distância da linha de parafusos até ao reforço (figura 2.19).

$$m_2 = 39,65 - 0,8 \times \sqrt{2} \times 7 = 31,73 \text{ mm} \quad (4.245)$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} = \frac{30,85}{30,85 + 60} = 0,34 \quad (4.246)$$

$$\lambda_2 = \frac{31,73}{30,85 + 60} = 0,35 \quad (4.247)$$

$$\alpha \approx 7,2 \quad (4.248)$$

O comprimento efetivo para esta linha de parafusos é obtido de acordo com o quadro 4.12

Quadro 4.12: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 1ª linha de parafusos isolada (ligação reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares $l_{\text{eff,cp}}$	Sem troços circulares $l_{\text{eff,nc}}$
	$2\pi m = 2\pi \times 30,85 = 193,84 \text{ mm}$ $\pi m + 2e_1 = \pi \times 30,85 + 2 \times 2460,35 = 5017,62 \text{ mm}$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$ $= 2460,35 + 7,2 \times 30,85 - (2 \times 30,85 + 0,625 \times 60)$ $= 2583,27 \text{ mm}$
Modo 1:	$l_{\text{eff,1}} = l_{\text{eff,nc}} = 2583,27 \text{ mm}$ mas $l_{\text{eff,1}} \leq l_{\text{eff,cp}} = 193,84 \text{ mm}$	
Modo 2:	$l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}} = 2583,27 \text{ mm}$	

b) 2ª linha de parafusos isolada:

É também uma linha adjacente a um reforço, contudo não é de extremidade. Neste caso em particular os valores de m_2 e α são iguais aos da 1ª linha de parafusos (ver quadro 4.13).

Quadro 4.13: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos isolada (ligação reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares	Sem troços circulares
	$l_{\text{eff,cp}}$	$l_{\text{eff,nc}}$
	$2\pi m = 193,84\text{mm}$	$\alpha m = 7,2 \times 30,85 = 222,12\text{mm}$
Modo 1:	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff,nc}} = 193,84\text{mm}$ mas $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff,cp}} = 193,84\text{mm}$	
Modo 2:	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff,nc}} = 5017,62\text{mm}$	

Devido à semelhança das propriedades geométricas entre a 2ª e a 4ª linha de parafusos e devido ao facto de ambas serem linhas de parafusos adjacentes a um reforço mas não de extremidade, os cálculos correspondentes à 4ª linha de parafusos isolada são idênticos aos da 2ª linha.

c) Grupo de parafusos 2+3+4

$$p_{2-3} = 90\text{mm} \quad (4.249)$$

$$p_{3-4} = 109,30\text{mm} \quad (4.250)$$

O cálculo do comprimento efetivo da 2ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3+4) é efetuado de acordo com o quadro 4.14:

Quadro 4.14: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 2ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares	Sem troços circulares
	$l_{\text{eff,cp}}$	$l_{\text{eff,nc}}$
	$\pi m + p_{2-3} = \pi \times 30,85 + 90 = 186,92\text{mm}$	$0,5p_{2-3} + \alpha m - (2m + 0,625e)$ $= 0,5 \times 90 + 7,2 \times 30,85 - (2 \times 30,85 + 0,625 \times 60)$ $= 167,92\text{mm}$

Cálculo do comprimento efetivo da 3ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3+4):

Como a 3ª linha de parafusos se situa no interior do grupo, o comprimento efetivo desta linha é dado pelas seguintes expressões (ver quadro 4.15):

Quadro 4.15: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 3ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares	Sem troços circulares
	$l_{\text{eff,cp}}$	$l_{\text{eff,nc}}$
	$2p = 2 \left(\frac{p_{2-3}}{2} + \frac{p_{3-4}}{2} \right) = 90 + 109,30$ $= 199,30\text{mm}$	$p = \frac{p_{2-3}}{2} + \frac{p_{3-4}}{2} = \frac{90}{2} + \frac{109,3}{2} = 99,65\text{mm}$

Cálculo do comprimento efetivo da 4ª linha de parafusos como parte do grupo (2+3+4) (ver quadro 4.16):

Quadro 4. 16: Comprimento efetivo do banzo do pilar à flexão para a 4ª linha de parafusos como parte do grupo 2+3+4 (ligação reforçada)

O menor dos seguintes valores	Com troços circulares	Sem troços circulares
	$l_{\text{eff,cp}}$	$l_{\text{eff,nc}}$
	$\pi m + p_{3-4} = \pi \times 30,85 + 109,3 = 206,22\text{mm}$	$0,5p_{2-3} + \alpha m - (2m + 0,625e)$ $= 0,5 \times 109,3 + 7,2 \times 30,85 - (2 \times 30,85 + 0,625 \times 60)$ $= 177,57\text{mm}$

Cálculo do comprimento efetivo total do grupo (2+3+4):

$$\sum l_{\text{eff,nc}} = 167,92 + 99,65 + 177,57 = 445,14\text{mm} \quad (4.251)$$

$$\sum l_{\text{eff,cp}} = 186,92 + 199,30 + 206,22 = 592,44\text{mm} \quad (4.252)$$

$$\sum l_{\text{eff,1}} = \sum l_{\text{eff,nc}} = 445,14\text{mm} \leq \sum l_{\text{eff,cp}} = 592,44\text{mm} \quad (4.253)$$

$$\sum l_{\text{eff,2}} = \sum l_{\text{eff,nc}} = 445,14\text{mm} \quad (4.254)$$

4.2.3.3.2 – Componente 3 – Alma do pilar sob tração transversal

Para ter em conta os efeitos da chapa de reforço da alma do pilar em conformidade com o ponto 2.4.3, a espessura efetiva da alma do pilar à tração para um metal de classe S355 e cordões de soldadura de ângulo é dada por:

$$t_{w,\text{eff}} = 1,4t_{wc} = 1,4 \times 9,5 = 13,30\text{mm} \quad (4.255)$$

A área de corte considerada é igual à área calculada no ponto 4.2.3.2.1, ou seja:

$$A_{vc} = 42,36\text{cm}^2 \quad (4.256)$$

Como o método de cálculo do valor resistente desta componente é idêntico para todas as linhas de tração (apenas muda o valor do comprimento efetivo), é apenas detalhado o cálculo correspondente à 1ª linha de tração:

$$b_{\text{eff,t,wc}} = l_{\text{eff,1}} = 193,84\text{mm} \text{ (ver 4.2.3.3.1)} \quad (4.257)$$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{\text{eff,t,wc}}t_{w,\text{eff}}/A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(193,84 \times 13,30/4236)^2}} = 0,82 \quad (4.258)$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{\text{eff,t,wc}} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,82 \times 193,84 \times 13,30 \times 355 \times 10^{-3}}{1} = 751,91\text{KN} \quad (4.259)$$

4.2.4 – Momento resistente da ligação reforçada

O cálculo do momento resistente da ligação, é feito de acordo com o ponto 2.5.3.1 obtendo-se:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (4.260)$$

Dos quadros A.6, A.7 e A.8, verifica-se que as componentes condicionantes de cada linha de tração ou compressão têm os seguintes valores:

Quadro 4.17: Valor resistente das linhas de tração e compressão da ligação reforçada

Linha	Componente	$F_{tr,Rd} (KN)$	$h_r (mm)$
1	5	305,39	334,3
2	4	341,41	244,3
3	4	290,93	154,3
4	4	247,06	45
Compressão	7	777,11	-

$$\sum_r F_{tr,Rd} = F_{cr,Rd} = F_{c,fb,Rd} = 771,11KN \quad (4.261)$$

Verificação das linhas tracionadas:

a) 1ª Linha:

$$\sum_r F_{tr,Rd} = 305,39KN < 771,11KN \quad (4.262)$$

b) 2ª Linha:

$$\sum_r F_{tr,Rd} = 305,39 + 341,41 = 646,80KN < 771,11KN \quad (4.263)$$

c) 3ª Linha:

$$\sum_r F_{tr,Rd} = 305,39 + 341,41 + 290,93 = 937,73KN > 771,11KN \quad (4.264)$$

Visto que a soma da resistência das primeiras três linhas à tração ultrapassa o valor da compressão máxima admissível, conclui-se que a 4ª linha de parafusos não se encontra à tração. Assim, a força de tração máxima na 3ª linha de parafusos permitida pelo equilíbrio de forças é dada por:

$$F_{t3,Rd} = F_{cr,Rd} - (F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}) = 771,11 - 646,80 = 124,31KN \quad (4.265)$$

Analisando estes resultados, conclui-se que a chapa de alma teve o efeito pretendido ou seja, aumentar o valor resistente da linha de compressão para permitir que mais linhas de parafusos se encontrem à tração.

O momento resistente da ligação reforçada é dado por:

$$M_{j,Rd} = h_1 F_{t1,Rd} + h_2 F_{t2,Rd} + h_3 F_{t3,Rd} \quad (4.266)$$

$$M_{j,Rd} = (305,39 \times 334,3 + 341,41 \times 244,3 + 124,31 \times 154,3) \times 10^{-3} = 204,68 \text{KNm} \quad (4.267)$$

O momento resistente máximo permitido pelas soldaduras é igual ao calculado para a ligação não reforçada.

$$M_{w,Rd} = 247,66 \text{KNm} > M_{j,Rd} = 204,68 \text{KNm} \quad (4.268)$$

4.2.5 – Verificação de segurança à flexão

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1(=) \frac{165}{204,68} = 0,81 \leq 1 \quad (4.269)$$

Deste modo, verifica-se a segurança da ligação à flexão.

4.2.6 – Verificação de segurança ao esforço transversal

4.2.6.1 – Parafusos ao corte

Neste caso de estudo as três primeiras linhas de parafusos encontram-se à tração. Assim, tendo em conta as expressões 2.44 e 2.45 para considerar a combinação de corte e tração, a força de corte máxima em cada linha de tração é dada por:

1ª linha de parafusos (igual ao primeiro caso de estudo):

$$V_{Ed} = 74,81 \text{KN} \quad (4.270)$$

2ª linha de parafusos:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \times 2 \times \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \times 2 \times F_{t,Rd}}\right) = 98 \times 2 \times \left(1 - \frac{341,41}{1,4 \times 2 \times 176,4}\right) = 60,52 \text{KN} \quad (4.271)$$

3ª linha de parafusos:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \times 2 \times \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \times 2 \times F_{t,Rd}}\right) = 98 \times 2 \times \left(1 - \frac{124,31}{1,4 \times 2 \times 176,4}\right) = 146,67 \text{KN} \quad (4.272)$$

Como os 2 parafusos inferiores não se encontram à tração, a resistência total dos parafusos ao corte é dada por:

$$F_{v,Rd} = 98 \times 2 + 74,81 + 60,52 + 146,67 = 478 \text{KN} \geq V_{Ed} = 117 \text{KN} \quad (4.273)$$

Está pois verificada a segurança dos parafusos ao corte.

4.2.6.2 – Cordões de soldadura ao corte

Como os cordões de soldadura que se consideraram como resistentes ao corte para o caso da ligação reforçada são os mesmos que se consideraram para o caso da ligação não reforçada, o valor resistente não se altera. Assim:

$$F_{W.Rd} = 462,70KN \geq V_{Ed} = 117KN \quad (4.274)$$

4.2.7 – Rigidez axial das componentes

Devido à utilização de reforços transversais nas zonas de tração e de compressão, a rigidez axial das componentes da linha de compressão passa a ser considerada como infinita. O cálculo da rigidez axial das componentes das linhas de tração é idêntico ao considerado no ponto 4.1.8. É apenas necessário ter em atenção que devido à chapa de reforço da alma do pilar, a área de corte deste foi aumentada e a espessura da alma do pilar deve ser considerada como a espessura efetiva da alma reforçada. Tomando como exemplo o caso da alma do pilar à tração na 1ª linha de parafusos, tem-se:

$$k_{3.1} = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_{w,eff}}{d_c} = \frac{0,7 \times 193,84 \times 13,3}{152} = 11,87mm \quad (4.275)$$

Os valores das rigidezes das restantes componentes encontram-se no quadro A.9, incluindo os valores correspondentes à 3ª linha de parafusos que como neste caso de estudo se encontra à tração também deve ser considerada.

4.2.8 – Rigidez rotacional da junta

Os valores utilizados para calcular a rigidez rotacional da ligação reforçada encontram-se no quadro A.9.

Rigidez efetiva da 1ª linha de parafusos:

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3.1}} + \frac{1}{k_{4.1}} + \frac{1}{k_{5.1}} + \frac{1}{k_{10.1}}} = 3,28mm \quad (4.276)$$

Rigidez efetiva da 2ª linha de parafusos:

$$k_{eff,2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3.2}} + \frac{1}{k_{4.2}} + \frac{1}{k_{5.2}} + \frac{1}{k_{10.2}}} = 3,09mm \quad (4.277)$$

Rigidez efetiva da 3ª linha de parafusos:

$$k_{eff,3} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3.3}} + \frac{1}{k_{4.3}} + \frac{1}{k_{5.3}} + \frac{1}{k_{10.3}}} = 2,16mm \quad (4.278)$$

Braço binário equivalente:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} = 275,73mm \quad (4.279)$$

Rigidez equivalente das linhas de parafusos à tração:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} = 7,23mm \quad (4.280)$$

Rigidez rotacional inicial da ligação:

$$S_{j,ini} = 115443,31KNm/Rad \quad (4.281)$$

Rigidez rotacional reduzida da ligação:

Do quadro 2.10 sabe-se que $\eta = 2$. Logo:

$$S_j = S_{j,ini}/\eta = \frac{115443,31}{2} = 57721,66KNm/Rad \quad (4.282)$$

4.2.9 – Classificação da ligação quanto à sua rigidez

De acordo com os princípios enunciados no ponto 2.10, a ligação é considerada como rígida.

$$k_b EI_b / L_b = 43869KN/Rad \leq S_{j,ini} = 115443,31KN/Rad \quad (4.283)$$

4.2.10 – Comparação dos resultados calculados manualmente com os resultados do Powerconnect

Ao contrário do primeiro caso de estudo, existem diferenças significativas a nível global entre os valores obtidos pelos cálculos manuais e pelo Powerconnect como se pode verificar pelo erro relativo da rigidez rotacional e do momento resistente.

$$\varepsilon_{M,Rd} = \frac{|M_{j,Rd,C.M} - M_{j,Rd,Pc}|}{M_{j,Rd,cm}} \times 100 = \frac{|204,68 - 185,4|}{204,68} \times 100 = 9,42\% \quad (4.284)$$

$$\varepsilon_{S,ini} = 17,83\% \quad (4.285)$$

$$\varepsilon_S = 17,83\% \quad (4.286)$$

A grande diferença entre os valores da resistência da ligação à flexão deve-se provavelmente ao facto da força de compressão condicionante para este caso de estudo, a alma e banzo da viga à compressão, apresentar valores significativamente diferentes para o Powerconnect e para os cálculos manuais. No primeiro caso de estudo, apesar da diferença entre os valores resistentes desta componente ser a mesma que para o segundo caso de estudo, o momento resistente da ligação não foi afetado pois esta componente não era tão condicionante.

Quanto à rigidez de rotação da ligação, a fonte do erro entre resultados deve-se provavelmente ao facto de os valores da rigidez axial para a alma do pilar à tração e para os parafusos à tração apresentarem diferenças muito acentuadas entre si, como se pode observar no quadro A.9.

A sobreposição gráfica das curvas momento-rotação respetivas aos dois processos de cálculo (figura 4.10) permite uma melhor compreensão das diferenças entre ambos.

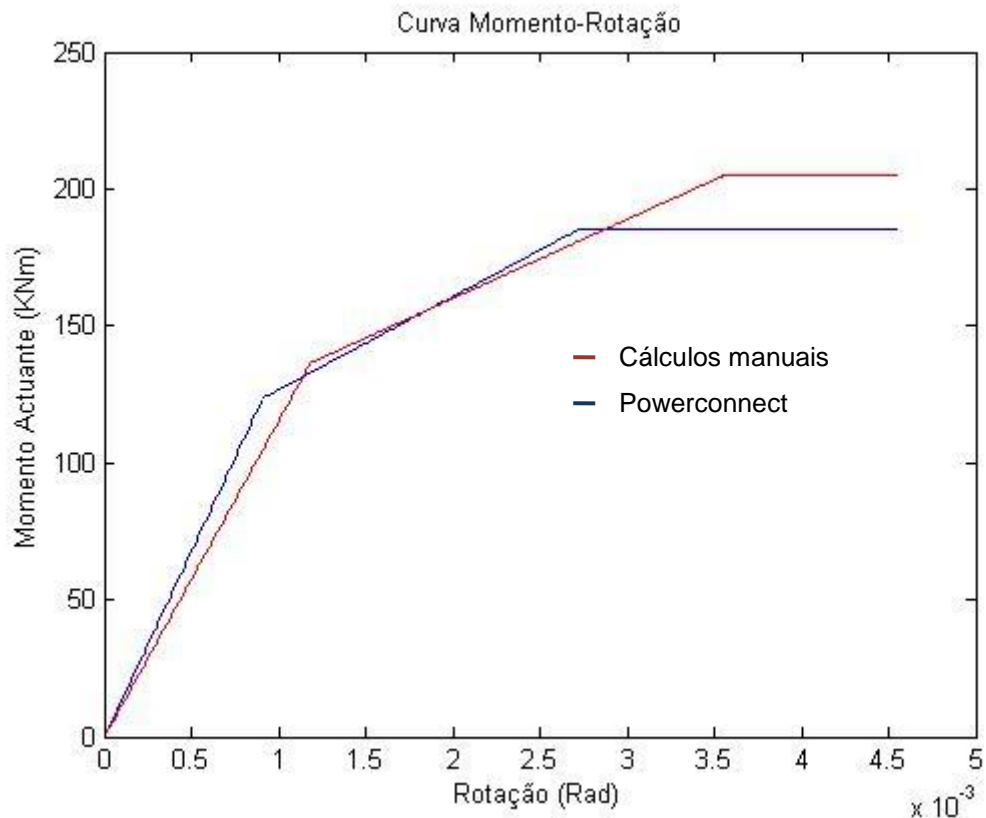


Figura 4.10: Curva momento-rotação do segundo caso de estudo

Verificou-se também que com a adição dos dois reforços transversais no pilar, o programa de cálculo automático não considera as componentes 2 e 3 (alma do pilar em compressão e tração transversal). Contudo, não sendo componentes condicionantes para o segundo caso de estudo, a ausência destes valores no Powerconnect não influenciou a diferença de resultados a nível global.

Em relação à resistência dos parafusos ao corte verifica-se uma diferença de 10% (ver quadro A.10 em anexo). Esta diferença deve-se ao facto de existir uma divergência na força máxima de tração desenvolvida na terceira linha de parafusos, o que afeta a verificação de combinação de corte e tração.

5 – Ligações Semi-rígidas: modelação e resultados

Para verificar os efeitos que as ligações semi-rígidas podem ter na distribuição de esforços de estrutura, mais concretamente a nível dos momentos fletores atuantes, criaram-se três modelos no SAP2000 com as dimensões descritas no primeiro caso de estudo (dois pilares HEB220 articulados na base e com 2,5 metros de altura, e uma viga IPE300 com 10 metros de vão).

Para simplificar esta análise, considerou-se desprezável o peso próprio da estrutura, assim como os efeitos na distribuição de esforços provocados por eventuais elementos estruturais situados numa cota superior às ligações. Nestas condições, a modelação dos pilares situados a um nível superior ao das juntas torna-se desnecessária.

5.1 – Modelo 1

No primeiro modelo (figura 5.1) as ligações viga pilar são consideradas completamente rígidas, tendo sido atribuída uma carga uniformemente distribuída ao longo da viga, $q_1 = 23,42 \text{ KN/m}$.

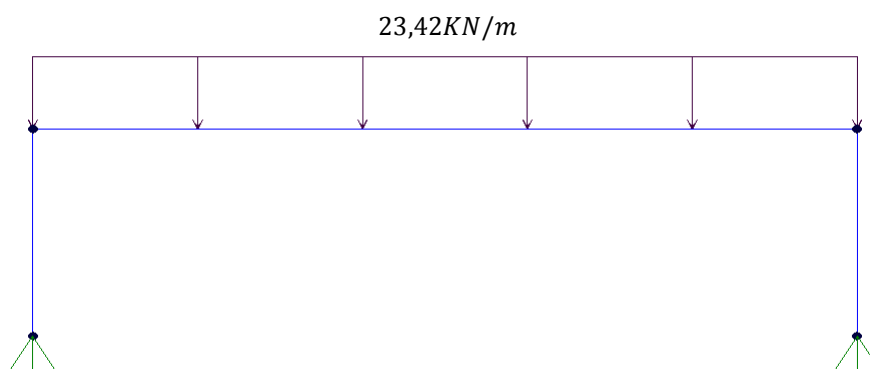


Figura 5.1: Modelo 1 do SAP2000

A partir da análise deste modelo foi obtido o seguinte diagrama de momentos fletores:

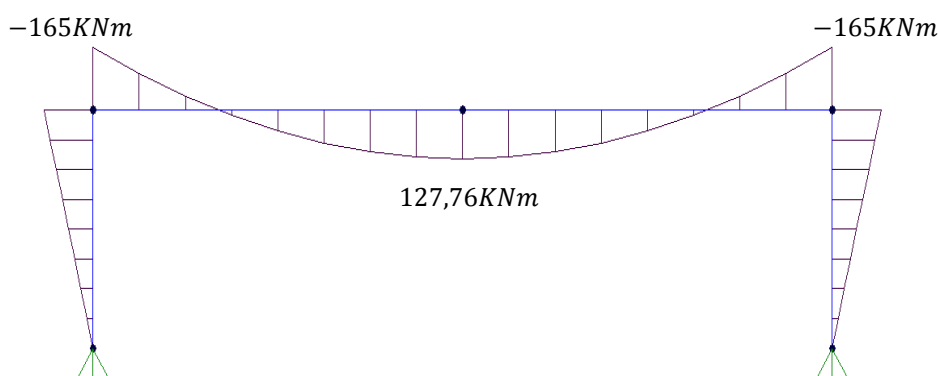


Figura 5.2: Diagrama de momentos fletores do 1º modelo do SAP2000

Verificou-se também que a força de compressão atuante na viga é de 66 KN e que o esforço transversal nas extremidades da viga tem o valor absoluto de $117,10 \text{ KN}$. Estes valores foram considerados como os esforços atuantes para os casos analisados no capítulo 4.

5.2 – Modelo 2

O segundo modelo representa a estrutura considerada no capítulo 4.1 quando as ligações apresentam rigidez de rotação linear ($2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$). Assim as ligações foram modeladas com uma rigidez rotacional $S_{j,ini} = 31719,34 \text{KNm/Rad}$.

Para simular as ligações semi-rígidas, rotulou-se cada ligação viga-pilar e introduziu-se um elemento diagonal de comprimento muito reduzido, ligando as extremidades adjacentes do pilar e da viga (ver figura 5.3) dotada de uma rigidez rotacional igual a $S_{j,ini}$ na direção perpendicular ao plano da figura, [5]. A rigidez do elemento diagonal para deslocamentos e rotações em todas as outras direções é nula. Assim, a passagem dos esforços transversos e normais da viga para o pilar é feita através da rótula, enquanto que os momentos fletores são transferidos pela ligação diagonal.

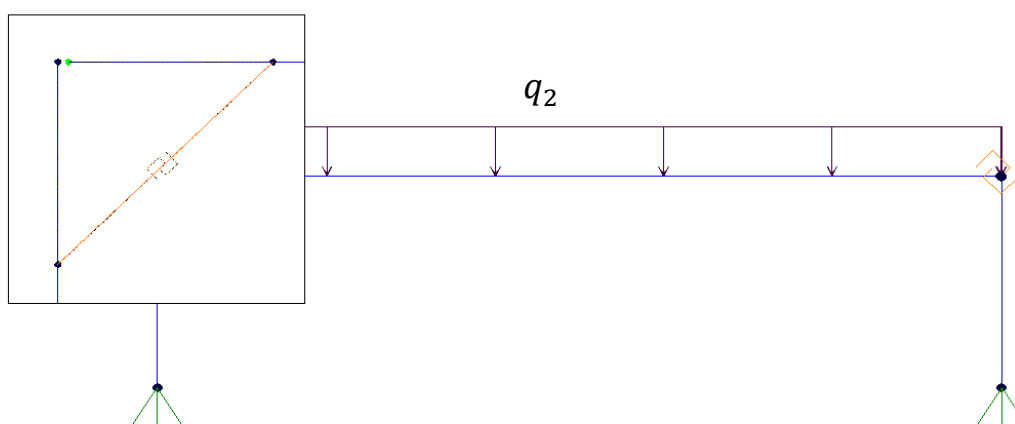


Figura 5.3: Modelo 2 do SAP2000

O objetivo deste modelo é descobrir qual a carga distribuída, q_2 , que provoca um momento fletor nas extremidades da viga tal que a ligação considerada no primeiro caso de estudo do capítulo 4 passe de um comportamento linear para um comportamento não-linear. Assim, o momento fletor atuante na ligação provocado pela carga distribuída q_2 é aproximadamente $M_{j,Ed} = 2/3 M_{j,Rd} = 102,2 \text{KNm}$.

Para tal arbitrou-se inicialmente que a carga distribuída tinha o valor de 1KN/m e verificou-se que para esta carga o momento fletor atuante na ligação tinha o valor aproximado de $-6,46 \text{KNm}$. Sabendo que quando uma estrutura se encontra em regime elástico os esforços provocados por uma determinada ação são diretamente proporcionais à grandeza dessa ação, a carga q_2 é dada por:

$$q_2 = \frac{102,2 \times 1}{6,46} = 15,81 \text{KNm} \quad (5.1)$$

Na figura 5.4 está representado o diagrama de momentos resultante da aplicação desta carga no segundo modelo do SAP2000.

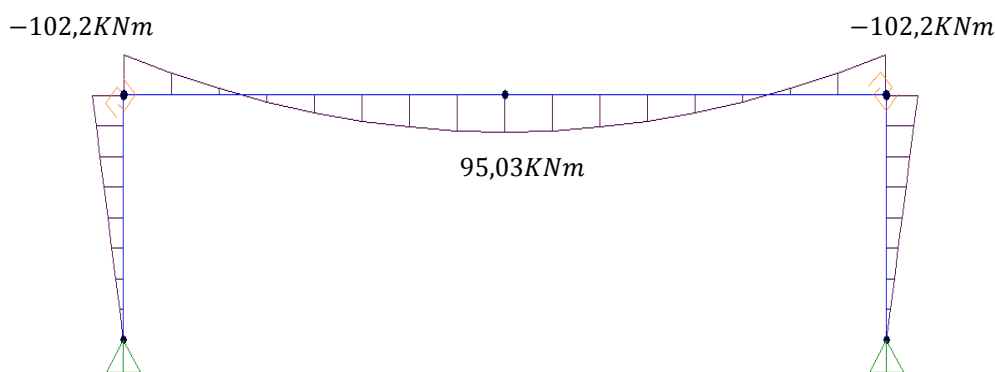


Figura 5.4: Diagrama de momentos fletores do 2º modelo do Sap2000

Para esta situação, a força de compressão atuante na viga é de 41,04 kN.

5.3 – Modelo 3

O terceiro modelo do SAP2000 foi criado com o propósito de analisar o comportamento da estrutura considerada no ponto 4.1 quando a ligação semi-rígida apresenta comportamento não-linear de deformações e comparar os resultados com os do primeiro modelo.

Para que a comparação dos resultados seja coerente, faz sentido que a carga distribuída considerada seja igual a q_1 . Contudo, através do modelo 2 verificou-se que a ligação tem comportamento linear para cargas com valor até q_2 . Então, tem que ser considerada uma terceira carga distribuída dada por:

$$q_3 = q_1 - q_2 = 7,61 \text{ kN/m} \quad (5.2)$$

A modelação da junta viga-pilar deste modelo é semelhante à do segundo modelo com a diferença de que a rigidez rotacional conferida ao elemento diagonal, $S_{j,3}$, é dada pelo declive da curva momento-rotação da figura 4.5 para momentos fletores com valores entre 102,2 kNm e 153,3 kNm do eixo correspondente ao momento atuante. Logo:

$$S_{j,3} = \frac{\Delta M_{j,Ed}}{\Delta \phi} \frac{153,3 - 102,2}{(9,67 - 3,22) \times 10^{-3}} = 7922,48 \text{ kNm/Rad} \quad (5.3)$$

Para a carga distribuída q_3 , o diagrama de momentos fletores obtido neste modelo está representado na figura 5.5.

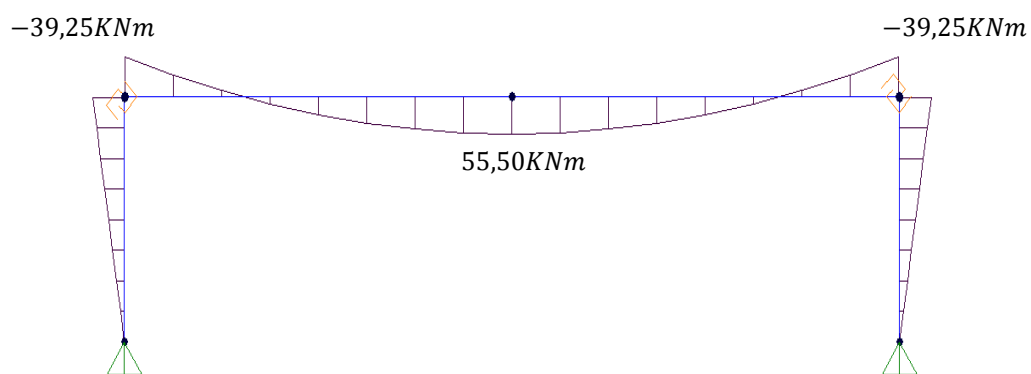


Figura 5.5: Diagrama de momentos fletores do 3º modelo do Sap2000

Neste modelo, a força de compressão resultante na viga é de 15,85 *KN*.

5.4 – Sobreposição de efeitos dos modelos 2 e 3 do Sap2000 e comparação com o primeiro modelo

Admitindo o comportamento semi-rígido das ligações estudadas no capítulo 4.1, através da sobreposição de efeitos do segundo e terceiro modelo, são obtidos os esforços atuantes na estrutura quando esta está sujeita à carga uniformemente distribuída q_1 . Assim os esforços atuantes na estrutura são dados por:

$$M_{Ed(-)} = -39,25 - 102,2 = -141,45 \text{KNm} \quad (5.4)$$

$$M_{Ed(+)} = 55,50 + 95,03 = 150,53 \text{KNm} \quad (5.5)$$

$$N_{Ed} = -41,04 - 15,85 = -56,89 \text{KNm} \quad (5.6)$$

Onde:

$M_{Ed(-)}$ – Momento atuante mínimo na viga;

$M_{Ed(+)}$ – Momento atuante máximo na viga;

N_{Ed} – Esforço normal atuante na viga.

Observando os valores obtidos através da sobreposição de efeitos do segundo e terceiro modelo do Sap2000 (ligação semi-rígida) e os obtidos no primeiro modelo (ligação rígida) podem retirar-se as seguintes conclusões:

- O valor absoluto do momento atuante na ligação rígida é superior ao da ligação semi-rígida;
- O valor absoluto do momento atuante a meio vão da viga é mais elevado quando são consideradas ligações semi-rígidas;
- A força de compressão atuante na viga é superior quando as ligações são consideradas como rígidas;
- Numa situação de projeto, para a estrutura considerada e para uma carga distribuída ao longo da viga de $23,42\text{KN/m}$, a ligação analisada no capítulo 4.1 verifica a segurança à flexão pois $\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{141,45}{153,30} = 0,92 \leq 1$. Caso a ligação tivesse sido considerada como rígida na análise global da estrutura, a segurança da ligação à flexão não estaria verificada, como se observou no capítulo 4.1.
- O valor absoluto máximo do momento atuante na viga quando se adotam ligações viga-pilar rígidas pode ser superior ao mesmo quando as ligações são consideradas como semi-rígidas.

6 – Caracterização da curva momento-rotação através de uma equação polinomial

6.1 – Método de cálculo da equação polinomial

Como já foi referido anteriormente, a curva momento-rotação de uma ligação em regime de deformações não-linear é caracterizada por uma geometria curvilínea (figura 2.2). Logo, a representação desta curva através de uma aproximação trilinear não é totalmente exata. Por forma a obter uma representação gráfica da curva momento-rotação curvilínea, propõe-se caracterizar o comportamento de uma ligação quando esta atinge o limiar do regime de deformações não-linear ($2/3M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$), por uma equação polinomial, mantendo uma estimativa linear da curva para $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$.

Para determinar a equação polinomial que caracteriza o comportamento da ligação em regime não-linear, consideram-se as seguintes condições de fronteira:

- O momento atuante quando a ligação entra em regime de deformações não-linear é igual a dois terços do momento resistente da ligação.

$$M_{j,Ed} = 2/3M_{j,Rd} \quad (6.1)$$

- No instante em que é atingido o comportamento não-linear da ligação, o declive da curva momento-rotação, é igual à rigidez rotacional inicial, $S_{j,ini}$.
- A rotação da ligação quando a mesma passa de comportamento linear para não-linear, $\phi_{j,el}$, é dada por:

$$\phi_{j,el} = \frac{2/3M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \quad (6.2)$$

- O momento atuante quando a ligação entra em colapso é igual ao momento resistente.

$$M_{j,Ed} = M_{j,Rd} \quad (6.3)$$

- A rotação da ligação quando o momento atuante iguala o momento resistente é dada por:

$$\phi_{j,Rd} = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} \quad (6.4)$$

- No instante em que é atingido o momento resistente, o declive da curva momento-rotação é nulo.
- A concavidade da curva quando é atingido o momento resistente, tem um valor negativo, arbitrando-se para essa concavidade o valor de -1.

Traduzindo estas condições de fronteira numa expressão matemática que representa o momento atuante em função da rotação da ligação, $M_{j,Ed}(\phi)$, são obtidas as seguintes expressões:

$$M_{j,Ed} \left(\phi = \frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right) = 2/3 M_{j,Rd} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial \left(M_{j,Ed} \left(\phi = \frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right) \right)}{\partial(\phi)} = S_{j,ini} \quad (6.6)$$

$$M_{j,Ed} \left(\phi = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) = M_{j,Rd} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \left(M_{j,Ed} \left(\phi = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) \right)}{\partial(\phi)} = 0 \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \left(\partial \left(M_{j,Ed} \left(\phi = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) \right) \right)}{\partial^2(\phi)} = -1 \quad (6.9)$$

Têm-se portanto quatro equações, o que quer dizer que a expressão de $M_{j,Ed}(\phi)$, é um polinómio de 4º grau com 5 incógnitas:

$$M_{j,Ed}(\phi) = a\phi^4 + b\phi^3 + c\phi^2 + d\phi + e \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial \left(M_{j,Ed}(\phi) \right)}{\partial(\phi)} = 4a\phi^3 + 3b\phi^2 + 2c\phi + d \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial \left(\partial \left(M_{j,Ed}(\phi) \right) \right)}{\partial^2(\phi)} = 12a\phi^2 + 6b\phi + 2c \quad (6.12)$$

Substituindo estas expressões polinomiais nas expressões 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} a \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right)^4 + b \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right)^3 + c \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right)^2 + d \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right) + e = 2/3 M_{j,Rd} \\ 4a \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right)^3 + 3b \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right)^2 + 2c \left(\frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} \right) + d = S_{j,ini} \\ a \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^4 + b \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^3 + c \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^2 + d \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) + e = M_{j,Rd} \\ 4a \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^3 + 3b \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^2 + 2c \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) + d = 0 \\ 12a \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right)^2 + 6b \left(\frac{M_{j,Rd}}{S_j} \right) + 2c = -1 \end{array} \right. \quad (6.13)$$

6.2 – Aplicação do método alternativo para a caracterização da curva momento rotação dos casos de estudo do capítulo 4

Recorrendo ao programa Matlab e substituindo os valores de $M_{j,Rd}$, $S_{j,ini}$ e S_j no sistema de equações 6.13 pelos valores calculados no ponto 4.1, calculou-se a expressão polinomial do momento atuante em função da rotação da ligação quando esta exibe um comportamento não linear para o primeiro caso de estudo. Assim, aplicando esta metodologia, o comportamento da ligação é regido pelas seguintes expressões:

- Para $\phi \leq \frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} = 3,22 \times 10^{-3} rad$:

$$M_{j,Ed}(\phi) = 31719,34\phi \quad (6.14)$$

- Para $3,22 \times 10^{-3} < \phi \leq \frac{M_{j,Rd}}{S_j} = 9,67 \times 10^{-3} rad$:

$$M_{j,Ed}(\phi) = -2,96 \times 10^{10} \phi^4 + 1,15 \times 10^9 \phi^3 - 1,66 \times 10^7 \phi^2 + 1,07 \times 10^5 \phi - 1,05 \times 10^2 \quad (6.15)$$

- Para $9,67 \times 10^{-3} < \phi$:

$$M_{j,Ed}(\phi) = 153,3 KNm \quad (6.16)$$

Nas figuras 6.1, e 6.2 podem ser observadas as sobreposições gráficas das aproximações trilinear e polinomial da curva momento-rotação correspondentes aos dois casos de estudo analisados no capítulo 4.

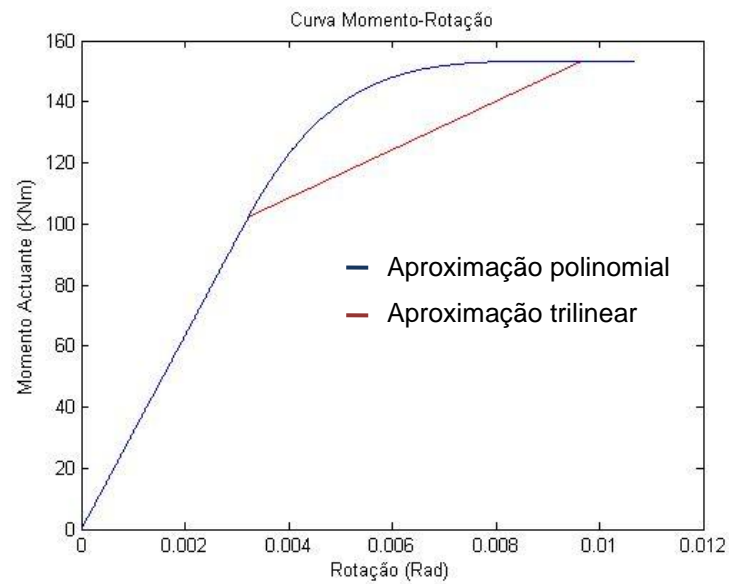


Figura 6.1: Aproximações polinomial e trilinear da curva momento rotação do primeiro caso de estudo

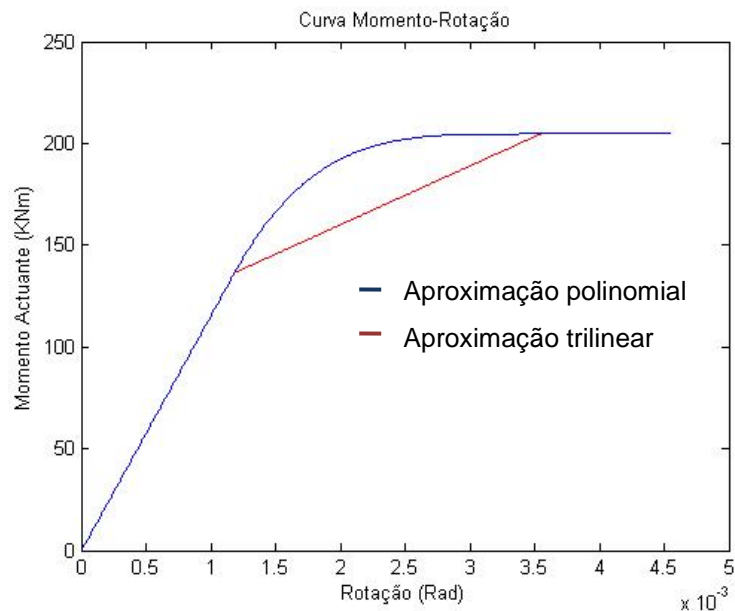


Figura 6.2: Aproximações polinomiais e trilinear da curva momento rotação do segundo caso de estudo

Para verificar se a diferença entre os resultados dos dois métodos é muito significativa, foi calculada a diferença relativa do momento atuante para os casos de estudo do capítulo 4, tendo como base o momento atuante determinado a partir da aproximação polinomial. A figura 6.3 corresponde à representação gráfica desta diferença percentual em função da rotação imposta nas ligações correspondentes aos dois casos de estudo analisados.

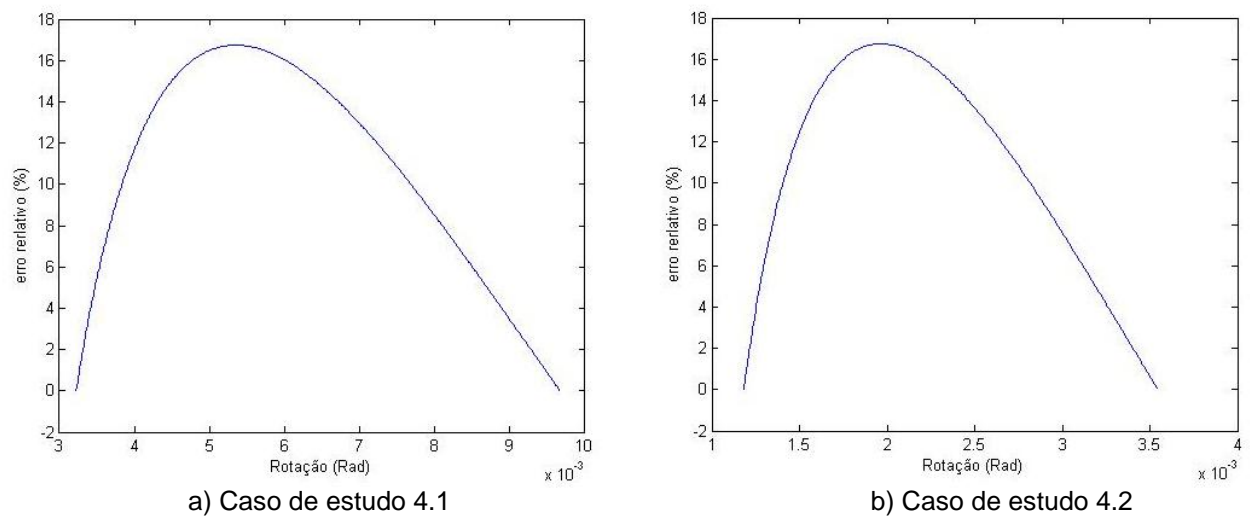


Figura 6.3: Diferença relativa entre os momentos atuantes obtidos pelas aproximações trilinear e polinomial das curvas momento-rotação correspondentes aos casos de estudo 4.1 e 4.2

Verificou-se em ambos os casos que a diferença relativa ultrapassa os 16%, o que é bastante significativo.

7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

Nos pontos seguintes, apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, apontando-se ainda tópicos que carecem de investigação futura.

7.1 – Avaliação do desempenho do Powerconnect

Em geral, os cálculos do valor resistente e rigidez axial das componentes de uma ligação aparafusada com chapa de extremidade obtidos através do Powerconnect parecem estar de acordo com os valores indicados pelo EC3, contudo, se existir uma diferença significativa no valor resistente ou na rigidez de uma componente condicionante, os valores do momento resistente e da rigidez rotacional da ligação serão bastante diferentes dos fornecidos pelo EC3, tal como aconteceu no caso da ligação reforçada do capítulo 4.2.

De forma a perceber melhor de onde podem surgir as diferenças entre os resultados do Powerconnect e dos cálculos manuais, sugerem-se os seguintes procedimentos:

- Verificação de todos os cálculos efetuados na determinação do valor resistente e rigidez das componentes;
- Recurso a referências bibliográficas, pois apesar do programa apresentar referências dos pontos do EC3 correspondentes ao cálculo de cada componente, algumas metodologias utilizadas não se encontram no EC3, como por exemplo, a determinação do comprimento efetivo do cordão de soldadura correspondente a cada linha de parafusos.

Verificou-se também que deveria ser adicionado ao programa a metodologia descrita no ponto 2.3.3 para determinar o valor resistente de uma linha de parafusos quando esta perfaz parte de um grupo de linhas de parafusos.

Não obstante, apesar de não ser ainda um programa completamente aperfeiçoado, o Powerconnect pode ser utilizado como uma ferramenta muito eficiente para auxílio de dimensionamento de ligações metálicas, em especial para predimensionamento de reforços.

Propõe-se que no futuro se efetuem mais estudos sobre este programa, especialmente para verificar a sua precisão na análise de outros tipos de ligações que não tenham sido abordadas neste trabalho.

7.2 – Modelação de ligações semi-rígidas em projeto

No capítulo 5, verificou-se que a modelação de ligações semi-rígidas num projeto estrutural, pode levar a uma redução do valor absoluto do momento atuante máximo nos perfis e nas ligações metálicas. A diminuição do momento atuante facilita a verificação de segurança, possibilitando a adoção de perfis mais económicos e a redução ou mesmo a dispensa de reforços nas ligações, resultando em custos menores.

No futuro, poderão ser realizados trabalhos para otimizar a rigidez rotacional de uma ligação metálica viga-pilar para vários comprimentos de viga e pilar. Note-se que ligações viga-pilar demasiado flexíveis podem resultar em momentos atuantes muito elevados a meio vão das vigas. Assim, o ideal é obter uma ligação que permita um grande equilíbrio entre momentos fletores positivos e negativos.

7.3 – Aproximação polinomial da curva momento-rotação

Do ponto de vista científico, a metodologia do capítulo 6 para determinar a rotação correspondente a um determinado momento atuante na ligação não pode ser de todo considerada como mais precisa nem mais vantajosa do que a aproximação trilinear, pois não foram comparados os resultados com ensaios experimentais para verificar qual destas metodologias se aproxima mais da realidade.

Contudo, caso esta aproximação se venha a verificar como mais precisa no futuro, a sua implementação num programa de cálculo automático de ligações metálicas como o Powerconnect pode-se revelar útil para uma simulação mais precisa do comportamento de uma ligação à flexão, sem necessidade de grande esforço computacional.

Bibliografia

- [1] Buildsoft. Part 1: *Getting started with Powerconnect* [Em linha]. Disponível em: http://www.buildsoft.eu/en/manuals_en/PowerConnect
- [2] Centre Suisse pour la construction métallique. *Tables pour la construction métallique*, Zurich, Centre Suisse pour la construction métallique.
- [3] EN 1993-1-1. 2010. *Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Bruxelas, CEN.
- [4] EN 1993-1-8 (2010). *Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – parte 1-8: Projeto de ligações*, Bruxelas, CEN.
- [5] Kalny, Ondrej. 2013). CSI Knowlegde Base: SAP 2000 [Em linha]. Disponível em: <https://wiki.csiamerica.com/display/sap2000/Home>
- [6] Lee, Sang-Sup e Moon, Tae-Sup. 2001. *Moment-rotation model of semi-rigid connections with angles*, Seoul, Hanyang University.
- [7] Maggi, Yuri Ivan. 2004. *Análise do comportamento Estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida*, Tese de doutoramento em Engenharia Civil, São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- [8] Pereira, José António Lopes. 2008. *Ligações de estruturas metálicas correntes*, Tese de licenciatura, Porto, Universidade Fernando Pessoa.
- [9] Rodrigues, Monique Cordeiro. 2009. *Modelagem numérica de ligações viga-coluna em aço sob momento fletor e força normal*, Tese de mestrado, Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- [10] SCI/BCSA Connections Group. 1995. *Joints in Steel Construction: Moment Connections*, Ascot, The steel construction institute.
- [11] Silva, L. Simões da Silva e Santiago, Aldina. 2003. *Manual de ligações metálicas*, Coimbra, Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- [12] Silva, L. Simões. 2002. *Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento*, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, nº 50, p. 49-67.

Anexo – Resistências e rigidezes das componentes das ligações analisadas

Quadro A.1: Resistência das componentes 3 e 4 da ligação não reforçada

Componentes 3 e 4			Banzo do pilar à flexão transversal									Alma de coluna á tração		
Grupo	I _b [*] (mm)	Linha/as	1º modo de rotura			2º modo de rotura			3º modo de rotura					
			C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
1	79,73	1	571,03	571,00	0,00	325,88	326,50	0,19	352,80	352,80	0,00	522,48	519,80	0,51
2	79,73	2	571,03	571,00	0,00	325,88	326,40	0,16	352,80	352,80	0,00	522,48	520,30	0,42
2+1	107,17	2+1	849,59	853,30	0,44	580,79	581,60	0,14	705,60	705,60	0,00	648,15	647,60	0,09
		2	544,19	-	-	275,40	-	-	400,21	-	-	342,76	-	-
3	79,73	3	571,03	571,00	0,00	325,88	326,40	0,16	352,80	352,80	0,00	522,48	520,30	0,42
3+2	107,17	3+2	849,59	853,50	0,46	580,79	581,70	0,16	705,60	705,60	0,00	648,15	647,70	0,07
		3	574,19	-	-	305,39	-	-	430,20	-	-	372,75	-	-
3+2+1	122,52	3+2+1	1114,72	1120,20	0,49	835,71	836,90	0,14	1058,40	1058,40	0,00	718,45	718,20	0,04
		3	533,92	-	-	254,91	-	-	477,61	-	-	137,66	-	-
4	79,73	4	571,03	571,00	0,00	325,88	326,50	0,19	352,80	352,80	0,00	522,48	519,80	0,51
4+3	100,45	4+3	906,44	910,80	0,48	593,43	594,40	0,16	705,60	705,60	0,00	666,38	665,60	0,12
		4	768,78	-	-	455,77	-	-	567,94	-	-	528,72	-	-
4+3+2	116,58	4+3+2	1171,57	1178,10	0,56	848,34	849,80	0,17	1058,40	1058,40	0,00	729,48	729,00	0,07
		4	758,51	-	-	435,28	-	-	645,34	-	-	316,43	-	-
4+3+2+1	126,75	4+3+2+1	1436,70	1445,30	0,60	1103,26	1105,20	0,18	1411,20	1411,20	0,00	768,56	768,30	0,03
		4	718,25	-	-	384,80	-	-	692,75	-	-	50,11	-	-

C.M – Cálculos manuais;

P.C – PowerConnect.

Quadro A.2: Resistência das componentes 5 e 8 da ligação não reforçada

Componentes 5 e 8			Chapa de extremidade em flexão transversal						Alma da viga à tração		
Grupo	I _b [*] (mm)	Linha/as	1º modo de rotura			2º modo de rotura					
			C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
1	78,27	1	492,28	492,00	0,06	305,39	302,60	0,91	-	-	-
2	63,69	2	892,02	892,20	0,02	416,89	417,00	0,03	610,06	607,00	0,50
3	67,28	3	844,41	846,80	0,28	383,65	384,20	0,14	577,50	576,10	0,24
3+2	85,71	3+2	1325,69	1327,80	0,16	686,60	687,10	0,07	906,65	903,40	0,36
		3	1050,29	-	-	411,20	-	-	631,25	-	-
4	63,69	4	892,02	892,20	0,02	416,89	416,40	0,12	610,06	606,20	0,63
4+3	81,35	4+3	1396,82	1396,10	0,05	702,40	702,30	0,01	955,29	948,60	0,70
		4	1259,16	-	-	564,74	-	-	817,63	-	-
4+3+2	90,75	4+3+2	1878,10	1877,80	0,02	1005,35	1005,30	0,01	1284,45	1275,90	0,67
		4	1465,04	-	-	592,29	-	-	871,39	-	-

Quadro A.3: Resistência das componentes 1, 2 e 7 da ligação não reforçada

Componentes 1, 2 e 7			
	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
Fc-1	515,02	515,1	0,02
Fc-2	558,38	563,1	0,85
Fc-7	771,11	649,6	15,76

Quadro A.4: Rigidez das componentes da ligação não reforçada

Rigidez das componentes			
	C.M (mm)	P.C (mm)	Erro (%)
k1	3,67	3,5	4,63
k2	9,65	10	3,63
k3.1	6,31	6,3	0,16
k3.2	3,94	3,9	1,02
k4.1	18,11	18,5	2,15
k4.2	11,3	11,5	1,77
k5.1	24,79	24,8	0,04
k5.2	25,19	25,5	1,23
k10.1	7,19	8,1	12,66
k10.2	7,19	8,1	12,66

Quadro A.5: Resistência dos elementos submetidos ao corte da ligação não reforçada

Resistência da ligação ao corte					
Parafusos ao corte			Cordões de soldadura ao corte		
C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
579,63	579,60	0,00	462,70	910,90	96,87

Quadro A.6: Resistência das componentes 3 e 4 da ligação reforçada

Componentes 3 e 4			Banzo do pilar à flexão transversal									Alma de coluna á tração		
Grupo	Ib*	Linha/as	1º modo de rotura			2º modo de rotura			3º modo de rotura					
			C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
1	79,73	1	571,03	571,00	0,00	1887,16	1945,60	3,10	352,80	352,80	0,00	751,91	-	-
2	79,73	2	571,03	571,00	0,00	341,41	343,70	0,67	352,80	352,80	0,00	751,91	-	-
3	79,73	3	571,03	571,00	0,00	325,88	326,40	0,16	352,80	352,80	0,00	751,91	-	-
3+2	99,03	3+2	919,46	931,50	1,31	596,32	599,00	0,45	705,60	705,60	0,00	982,78	-	-
		3	614,07	-	-	290,93	-	-	430,20	-	-	641,38	-	-
4	79,73	4	571,03	571,00	0,00	341,41	343,40	0,58	352,80	352,80	0,00	751,91	-	-
4+3	93,26	4+3	976,32	986,90	1,08	608,96	611,30	0,38	705,60	705,60	0,00	1008,47	-	-
		4	685,39	-	-	318,03	-	-	414,67	-	-	717,54	-	-
4+3+2	104,15	4+3+2	1311,32	1332,30	1,60	879,40	884,10	0,53	1058,40	1058,40	0,00	1117,15	-	-
		4	678,99	-	-	247,06	-	-	426,06	-	-	484,82	-	-

Quadro A.7: Resistência das componentes 5 e 8 da ligação reforçada

Componentes 5 e 8			Chapa de extremidade em flexão transversal						Alma da viga à tração		
Grupo	I _b [*] (mm)	Linha	1º modo de rotura			2º modo de rotura					
			C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
1	78,27	1	492,28	492,00	0,06	305,39	302,60	0,91	-	-	-
2	63,69	2	892,02	892,20	0,02	416,89	417,00	0,03	610,06	607,00	0,50
3	67,28	3	844,41	846,80	0,28	383,65	384,20	0,14	577,50	576,10	0,24
3+2	85,71	3+2	1325,69	1327,80	0,16	686,60	687,10	0,07	906,65	903,40	0,36
		3	984,28	-	-	345,19	-	-	631,25	-	-
4	63,69	4	892,02	892,20	0,02	416,89	416,40	0,12	610,06	606,20	0,63
4+3	81,35	4+3	1396,82	1396,10	0,05	702,40	702,30	0,01	955,29	948,60	0,70
		4	1259,16	-	-	564,74	-	-	817,63	-	-
4+3+2	90,75	4+3+2	1878,10	1877,80	0,02	1005,35	1005,30	0,01	1284,45	1275,90	0,67
		4	1465,04	-	-	592,29	-	-	871,39	-	-

Quadro A.8: Resistência das componentes 1, 2 e 7 da ligação reforçada

Componentes 1, 2 e 7			
	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
Fc-1	831,51	829,50	0,02
Fc-2	1615,71	-	0,85
Fc-7	771,11	649,60	15,76

Quadro A.9: Rigidez das componentes da ligação reforçada

Rigidez das componentes			
	C.M (mm)	P.C (mm)	Erro (%)
k3.1	11,87	12,60	6,13
k3.2	10,29	11,20	8,90
k3.3	6,10	6,50	6,50
k4.1	24,34	24,70	1,49
k4.2	21,08	21,80	3,40
k4.3	12,51	12,70	1,51
k5.1	24,79	24,80	0,03
k5.2	25,19	25,50	1,22
k5.3	12,54	12,70	1,25
k10.1	7,19	8,10	12,66
k10.2	7,19	8,10	12,66
k10.3	7,19	8,10	12,66

Quadro A.10: Resistência dos elementos submetidos ao corte da ligação reforçada

Resistência da ligação ao corte					
Parafusos ao corte			Cordões de soldadura ao corte		
C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)	C.M (KN)	P.C (KN)	Erro (%)
478,00	526,20	10,08	462,70	910,90	96,87